

## 明 細 書

## 三次元像表示装置及び三次元像表示方法

## 技術分野

- [0001] この発明は、ホログラムを呈示した空間光変調素子に照明光を入射させて三次元再生像を表示する装置及び方法に関するものである。

## 背景技術

- [0002] ホログラムを用いた三次元像表示装置は、ホログラムに照明光を入射させることで、このホログラムから再生光を発生させ、この再生光により三次元再生像を表示することができる。ホログラムは、物体光と参照光とを写真乾板上で干渉させることにより作成される他、計算によっても作成され得る。計算により作成されるホログラムは計算機ホログラムと呼ばれる。計算機ホログラムを用いた三次元像表示装置は、計算機ホログラムを空間光変調素子に呈示して、この空間光変調素子に照明光を入射させることにより、空間光変調素子から再生光を発生させて、この再生光により再生像を表示する。
- [0003] 計算機ホログラムを用いた三次元像表示技術として、特許文献1に開示されたものが知られている。この特許文献1に開示された技術では、表示すべき再生像(以下、目標再生像という。)を複数の輝点の集合体とみなして、これら複数の輝点それぞれから発生した球面波がホログラム面上に達するものと仮定する。ホログラム面上の各画素位置において、目標再生像上の複数の輝点それぞれから該画素位置に到達する球面波と平面伝搬波とを畳み込み積分することで、計算機ホログラムを作成する。この計算機ホログラムを呈示した空間光変調素子に照明光を入射させると、この空間光変調素子の各画素において照明光の振幅及び位相の少なくとも何れか一方が変調されて、空間光変調素子から再生光が発生する。そして、この再生光を再生像変換光学系(具体的には凸レンズ)により波面変換して虚像化又は実像化し再生像を表示する。
- [0004] また、この特許文献1では、空間光変調素子が振幅及び位相のうち何れか一方のみを変調することができる場合には、再生像変換光学系の後焦点面にマスクを設け

る。そして、このマスクにより、0次光(空間光変調素子に入射した照明光のうち当該入射方向と同一の出射方向に出た光)、不要な次数の回折波及び共役波を遮断する一方で、特定次数の回折による再生光を透過させて、この透過した再生光による再生像を観察者が観察できるようにしている。

[0005] 非特許文献1には、ランダムフェーズシフタ法について記載されている。画像を呈示した空間光変調素子に光を入射させて物体光を生成し、この物体光の光学的フーリエ変換を写真乾板上で参照光と干渉させて、これによりフーリエ変換ホログラムを記録すると、写真乾板上の1点に物体光が集中して入射することから感光材料の感光のダイナミックレンジを越えてしまい、再生像にはスペックル雑音が顕著に現れる。ランダムフェーズシフタ法は、このような問題を解決することを意図したものであり、画像を呈示する空間光変調素子において各画素の位相変調度をランダムにすることにより、写真乾板に入射する物体光の分布を広くして、写真乾板における光強度が感光材料の感光のダイナミックレンジを越えないようにする。これにより、スペックル雑音が低減された再生像を得ることができる。

[0006] 特許文献2、3又は非特許文献2には、観察者の両眼に異なった画像を表示する立体表示装置が記載されている。一般に、立体表示装置では、網膜上での画像の結像位置が固定され、両眼の視差による距離感と両眼の結像位置の間隔とが整合しないので、眼の焦点調節と輻輳との不一致に因り、観察者に大きな疲労を与える。特許文献2、3又は非特許文献2に記載された技術は、このような問題を解決することを意図したものである。

[0007] 特許文献2又は非特許文献2に記載されたマクスウェル視を利用した装置は、観察者の眼の瞳の中心を通過する光のみにより網膜上に画像を結像させる。これにより、観察者の眼の焦点調節に拘わらず、観察者が観察する画像のボケは少ない。一方、特許文献3に記載された超多眼条件を満たす装置は、複数の光束からなる視差画像を観察者の眼の瞳に入射させる。これにより、観察者の眼の焦点調節が立体像付近に導かれて、両眼の視差による距離感と両眼の結像位置の間隔とが整合する。

特許文献1:特開平9-258643号公報

特許文献2:特開2002-277822号公報

特許文献3:特開2002-228978号公報

非特許文献1:角田義人、「ホログラフィックな高密度画像記録」、光学、第2巻、第6号、第329頁ー第346頁、1973年

非特許文献2:安東孝久、他、「ホログラフィック光学素子によるマックスウェル視を用いたシースルーディスプレイ」、映像情報メディア学会誌、Vol.54、No.10、pp.1466-1473、2000年

### 発明の開示

### 発明が解決しようとする課題

- [0008] 発明者らは、従来の三次元像表示技術について検討した結果、以下のような課題を発見した。
- [0009] すなわち、上記特許文献1に開示されたような三次元像表示技術において、計算機ホログラムを作成する際の計算量や使用メモリ量が膨大になることから、これらを低減することが望まれる。そして、計算量や使用メモリ量の低減の為に、空間光変調素子から直接的に再生される像(以下、直接再生像という。)における各輝点位置を空間光変調素子の何れかの画素位置と光軸に垂直な面上で一致させること(以下、条件1という。)とともに、空間光変調素子と直接再生像との間の最短距離を照明光の波長の整数倍として各輝点の初期位相を一定値とすること(以下、条件2という。)が一般に行われる。
- [0010] これら条件1及び条件2について更に説明すると、以下のとおりである。仮に直接再生像における各輝点位置を空間光変調素子の何れかの画素位置と一致させない場合(すなわち、条件1が満たされない場合)には、ホログラム作成時の畳み込み積分の際に、直接再生像における各輝点位置と空間光変調素子の各画素位置との全ての組み合わせの場合について両者間の距離を計算する必要が生じて、計算量の爆発的増加を招くことになる。これに対して、条件1が満たされる場合には、直接再生像における各輝点位置と空間光変調素子の各画素位置との間の相対的位置関係の場合の数が少なくなるので、計算量が低減される。この条件1に加えて条件2も満たされることで、直接再生像における輝点から発生する球面波の種類の数が更に低減されて、予め計算して用意しておく球面波の計算結果を記憶するのに必要なメモリ量が

低減される。

[0011] しかしながら、条件1及び条件2の双方が満たされた場合に、他の或る条件が満たされるときには、以下のような問題が生じる。すなわち、条件1及び条件2の双方が満たされる場合には、直接再生像から再生像変換光学系の後焦点面までの光学的距離が一定であるので、この後焦点面上の1点に光が集中して入射する。そして、この集光点に入射した光は0次光マスクにより遮断されるので、観察者が観察することができる再生像の光量が減少する。特に、低い空間周波数成分が支配的である再生像である場合、すなわち、輝度値の変化が少ない再生像である場合には、再生光の大部分がマスクにより遮断されるので、観察者が観察することができる再生像の光量が大幅に減少する。また、観察者の眼の瞳に到達する再生光は、拡がりが不十分で、瞳の局所にしか分布せず、それ故、観察者の眼の焦点調節機能が有効に働かず、眼の焦点調節機能から検知される距離感が不足してしまう。

[0012] このような問題を解決するために、上記特許文献1に開示されたような三次元像表示技術において、上記非特許文献1に記載されたランダムフェーズシフタ法を援用することが考えられる。この場合、目標再生像の各輝点の初期位相をランダム値として、ホログラム面上の各画素位置において、目標再生像上の複数の輝点それぞれから該画素位置に到達する球面波と平面伝搬波とを畳み込み積分する。しかし、計算機ホログラムを呈示する空間光変調素子では各画素における光の振幅変調又は位相変調の階調数が限られていることから、畳み込み積分の際に高周波成分が互いに打ち消し合って、再生像の表示の際には高周波成分が表示されない場合が発生する。そして、高周波成分が表示されない場合がランダムに発生するので、再生像にはスペckル雑音が観察され、表示品質が著しく損なわれる。

[0013] 上記特許文献1に開示されたような三次元像表示技術において、上記特許文献2又は非特許文献2に記載されたマクスウェル視を利用すると、常にボケが少ない再生像が観察されるので、実空間におけるような眼の焦点調節が外れたときの物体までの距離に応じた自然なボケが再現されない。したがって、眼の焦点調節機能による距離感が損なわれる。

[0014] また、上記特許文献1に開示されたような三次元像表示技術において、上記特許



文献3に記載された超多眼条件を満たす装置を適用する場合には、観察者の眼の瞳面上で分割された複数の領域それぞれに異なった視差画像を入射させる表示素子と、この表示素子からの光束を瞳面上の複数の領域それぞれに導く光学系とが必要となる。したがって、装置が複雑で大型になってしまう。

- [0015] この発明は上述のような課題を解決するためになされたものであり、簡易な構成で観察者の眼の焦点調節機能を有効に働かせて高品質の再生像を表示することができる三次元像表示装置及び三次元像表示方法を提供することを目的としている。

#### 課題を解決するための手段

- [0016] この発明に係る三次元像表示装置は、離散的画素構造を有しホログラムを呈示する空間光変調素子と、ホログラムを呈示した空間光変調素子に照明光を入射させて再生光を発生させる照明光学系と、この再生光を波面変換して虚像化し再生像を表示する再生像変換光学系とを備える。特に、当該三次元像表示装置において、表示すべき目標再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の少なくとも何れか一方は、再生像変換光学系の後焦点面において空間光変調素子での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に到達する再生光のピークが複数箇所に発生するよう設定されている。これにより、目標再生像を表示し得るホログラムが空間光変調素子に呈示されることになる。

- [0017] また、この発明に係る三次元像表示方法は、離散的画素構造を有する空間光変調素子にホログラムを呈示し、この空間光変調素子に照明光を入射させて再生光を発生させ、この再生光を再生像変換光学系により波面変換して虚像化し再生像を表示する。特に、当該三次元像表示方法は、表示すべき目標再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の少なくとも何れか一方を、再生像変換光学系の後焦点面において空間光変調素子での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に到達する再生光のピークが複数箇所に発生するよう設定することにより、目標再生像を表示し得るホログラムを空間光変調素子に呈示させる。

- [0018] この発明によれば、離散的画素構造を有する空間光変調素子にホログラムが呈示され、この空間光変調素子に照明光が入射することで再生光が発生し、この再生光が再生像変換光学系により波面変換されて虚像化され再生像が表示される。特に、

空間光変調素子にホログラムが呈示されるに際しては、表示すべき目標再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の少なくとも何れか一方が適切に設定される。これにより、再生像変換光学系の後焦点面において、空間光変調素子での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に、再生光の複数のピークが到達する。したがって、観察者は、これら複数の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することで、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。

- [0019] なお、表示すべき目標再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の分布は周期的構造を有しているのが好適であり、再生像変換光学系の後焦点面における再生光のピーク位置の分布は、この周期的構造に応じたものとなる。
- [0020] この発明に係る三次元像表示装置又は三次元像表示方法では、目標再生像を構成する各輝点の初期位相値を時間経過とともに変化させるのが好適である。この場合には、再生像に重畳される干渉縞パターンは時間的に相殺されて、干渉縞パターンの影響が低減され、より鮮明な再生像が表示され得る。
- [0021] この発明に係る三次元像表示装置は、再生像変換光学系の後焦点面に設けられたマスクをさらに備えてもよい。このマスクは、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のうち該領域内に到達する再生光のうちピーク位置に到達する光成分を透過させる一方、特定次数以外の他の次数の回折による光成分を遮断する。また、この発明に係る三次元像表示方法は、このようなマスクを用い、該マスクを通過した光成分により再生像を表示するのが好適である。この場合には、不要な光が観察者の眼の瞳に入射するのを防止できて、より鮮明な再生像を観察することができる。
- [0022] この発明に係る三次元像表示方法は、再生像変換光学系の後焦点面において空間光変調素子での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に到達する再生光のピーク位置の間隔が、再生像を観察する観察者の瞳の径より小さいのが好適である。また、照明光の波長を $\lambda$ とし、再生像変換光学系の焦点距離を $f$ とし、空間光変調素子の画素ピッチを $p$ とし、再生像を観察する観察者の瞳の径を $d$ とし、目標再生像を構成する各輝点のうち初期位相値が等しい輝点の間隔を $Np$  ( $N$ は2以上の整

数)とすると、以下の関係が満たされるのが好適である。

[0023]  $d/2 > \lambda f / (Np)$

[0024] これらの場合には、これら複数の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することで、超多眼条件を満たすようになって、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。

[0025] なお、この発明に係る各実施例は、以下の詳細な説明及び添付図面によりさらに十分に理解可能となる。これら実施例は単に例示のために示されるものであって、この発明を限定するものと考えるべきではない。

[0026] また、この発明のさらなる応用範囲は、以下の詳細な説明から明らかになる。しかしながら、詳細な説明及び特定の事例はこの発明の好適な実施例を示すものではあるが、例示のためにのみ示されているものであって、この発明の思想及び範囲における様々な変形及び改良はこの詳細な説明から当業者には自明であることは明らかである。

### 発明の効果

[0027] この発明によれば、簡易な構成で、観察者の眼の焦点調節機能を有効に働かせて、高品質の再生像を表示することができる。

### 図面の簡単な説明

[0028] [図1]は、三次元像表示装置1の光学系及び動作を説明するための図である。

[図2]は、三次元像表示装置1から空間光変調素子及びレンズを除いた光学系を説明するための図である。

[図3]は、三次元像表示装置2の光学系を説明する図である。

[図4]は、比較例における直接再生像91の輝点間隔を説明する図である。

[図5]は、比較例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明するための図である。

[図6]は、第1実施例における直接再生像91の輝点間隔を説明するための図である。

[図7]は、第1実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説

明するための図である。

[図8]は、第2実施例における直接再生像91の輝点間隔を説明するための図である。

[図9]は、第2実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明するための図である。

[図10]は、第3実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明するための図である。

[図11]は、第4実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明するための図である。

[図12]は、第5実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明するための図である。

[図13]は、第5実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明するための図である。

[図14]は、第6実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明するための図である。

[図15]は、第6実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明するための図である。

[図16]は、第6実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明するための図である。

[図17]は、第6実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明するための図である。

[図18]は、第7実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明するための図である。

[図19]は、第8実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置及びマスク13の開口部13Aの形状を説明するための図である。

[図20]は、第8実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置及びマスク13の開口部13Aの形状を説明するための図である。

符号の説明



[0029] 1、2…三次元像表示装置、11…空間光変調素子、12…凸レンズ(再生像変換光学系)、13…マスク、13A…開口部、14…点光源、15…ハーフミラー、71…輝点、81…0次光到達位置、91…直接再生像、93…表示再生像。

#### 発明を実施するための最良の形態

[0030] 以下、この発明に係る三次元像表示装置及び三次元像表示方法の各実施例を、図1～図20を用いて詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

[0031] 或る物体を観察する観察者の眼の焦点調節機能を有効に働かせて観察者に距離感を感じさせるためには、その物体からの光が観察者の眼の瞳面に入射する必要がある。特に、物体からの光の波面が観察者の眼の瞳面の全体に入射する状態は、観察者にとって自然な状態であり、観察者の眼の焦点調節機能を有効に働かせて距離感を満足させる。観察者の眼の瞳面に到達する光の波面の広さは、瞳面の広さと同程度又は同程度以上であることが望ましい。観察者の眼の瞳面に到達する光の波面が広いほど、より有効に観察者の眼の焦点調節機能は働き、より強く観察者は距離感を感じることができる。

[0032] 逆に、観察者の眼の瞳面に到達する光の波面が狭く、瞳面の局所のみを光が通過するような場合には、レンズにおける瞳の絞りを小さくした状態と同様に、いわゆる被写体深度が深い状態となって、遠景及び近景の双方で焦点が合った状態となる。このような状態では、眼の焦点調節が外れたときの物体までの距離に応じた自然なボケが再現されず、眼の焦点調節機能による距離感が損なわれる。

[0033] ホログラムを用いた三次元像表示技術は、ホログラムに照明光を入射させて再生光を発生させて、この再生光により再生像を表示するものであって、自然界における物体からの光を再現するものである。したがって、ホログラムから発生した再生光の波面は、再生像を観察する観察者の眼の瞳面の広い範囲に到達することが望ましい。

[0034] 以下に説明するこの発明に係る三次元像表示装置及び三次元像表示方法は、観察者の眼の焦点調節機能を有効に働かせることができ、以上に記したような問題を解決することができるものである。

[0035] 図1は、三次元像表示装置1の光学系及び動作を説明する図である。この図に示さ

れる三次元像表示装置1は、空間光変調素子11、凸レンズ12及びマスク13を備える。なお、説明の便宜の為に、xyz直交座標系を設定して、z軸をレンズ12の光軸と一致させ、原点をレンズ12の後焦点位置と一致させる。

[0036] 空間光変調素子11は、離散的画素構造を有しており、複数の画素が一定ピッチで二次元配列されている。空間光変調素子11は、xy平面に平行に配置され、各画素に入射した光の振幅及び位相の少なくとも何れか一方を変調して透過させ、その変調した光を出力する。レンズ12は、再生像変換光学系として作用するものであり、空間光変調素子11により変調されて出力された光を入力し、この光を波面変換して虚像化し再生像を表示する。マスク13は、レンズ12の後焦点面に配置され、開口部13Aを有している。マスク13は、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のうち該領域内に到達する再生光のうちピーク位置の光線を開口部13Aにより透過させる一方、該領域の縁に到達する光線を遮断する。

[0037] 空間光変調素子11の各画素において光の振幅又は位相の変調度が設定されることで、空間光変調素子11にホログラムが呈示される。照明光90は、ホログラムが呈示された空間光変調素子11に対して、図1において左方から、平行光としてz軸に平行に入射する。空間光変調素子11に入射した照明光90は、各画素において振幅又は位相が変調される。この空間光変調素子11により画素毎に変調されて出力された光すなわち再生光は、直接再生像(空間光変調素子から直接的に再生される像)を形成する。図中において、輝点91a, 91bは直接再生像(虚像)の輝点を表し、輝点92a, 92bは直接再生像(実像)の輝点を表す。

[0038] 再生光は、レンズ12により波面変換されて虚像化され、再生像が形成される。図中において、輝点93a, 93bは再生像の輝点を表し、輝点94a, 94bは共役像の輝点を表す。そして、マスク13の開口部13Aの付近に眼の瞳を配置した観察者は、この開口部13Aを通して、再生像(以下、表示再生像という。)を観察することができる。このとき、0次光、不要な次数の回折波及び共役波は、マスク13により遮断され、観察者の眼の瞳には入射しない。

[0039] 直接再生像の輝点の座標値を( $ax'$ ,  $ay'$ ,  $az'$ )とし、これに対応する表示再生像の輝点の座標値を( $bx'$ ,  $by'$ ,  $bz'$ )とする。また、レンズ12の焦点距離をfとする。こ

のとき、これらのパラメータの関係は、相似関係から以下の式(1a)、(1b)で表され、また、レンズの結像公式から以下の式(2)で表される。

[数1]

$$ax' = f \frac{bx'}{bz'} \quad \dots (1a)$$

$$ay' = f \frac{by'}{bz'} \quad \dots (1b)$$

[数2]

$$\frac{1}{az' - f} + \frac{1}{f - bz'} = \frac{1}{f} \quad \dots (2)$$

[0040] これら式(1a)、(1b)及び式(2)から、直接再生像の輝点のz座標値 $az'$ は、以下の式(3)で表される。

[数3]

$$az' = 2f - \frac{f^2}{bz'} \quad \dots (3)$$

[0041] また、空間光変調素子11と直接再生像の輝点との間の距離 $z1$ は、以下の式(4)で表される。

[数4]

$$\begin{aligned} z1 &= az' - (L + f) \\ &= f - L - \frac{f^2}{bz'} \end{aligned} \quad \dots (4)$$

[0042] 空間光変調素子11において複数の画素がx軸方向及びy軸方向それぞれにピッチ $p$ で二次元配列されているとする。既述した条件1(直接再生像における各輝点位置を空間光変調素子11の何れかの画素位置とxy平面上で一致させること)から、直接再生像の輝点のx座標値 $ax'$ 及びy座標値 $ay'$ それぞれは、画素ピッチの整数倍として以下の式(5a)、(5b)で近似される。ここで、 $m$ ,  $n$ は整数である。これら $ax'$ ,  $ay'$ の近似値を $ax$ ,  $ay$ とする。

[数5]

$$ax' \approx m \cdot p = ax \quad \dots (5a)$$

$$ay' \approx n \cdot p = ay \quad \dots (5b)$$

[0043] 照明光90の波長を $\lambda$ とする。記述した条件2(空間光変調素子11と直接再生像との間の距離を照明光の波長 $\lambda$ の整数倍として各輝点の初期位相を一定値とすること)から、直接再生像の輝点のz座標値 $az'$ は、以下の式(6)で近似される。ここで、 $h$ は整数である。 $s$ は、一定の初期位相値を表し、簡易には値0とされる。この $az'$ の近似値を $az$ とする。

[数6]

$$az' \approx h \cdot \lambda + s = az \quad \dots (6)$$

[0044] これら $ax$ 、 $ay$ 、 $az$ を用いると、上記式(1a)、(1b)及び式(3)から、表示再生像の輝点の座標値 $bx$ 、 $by$ 、 $bz$ は、以下の式(7a)、(7b)、(7c)でそれぞれ表される。

[数7]

$$bx = \frac{ax \cdot bz}{f} \quad \dots (7a)$$

$$by = \frac{ay \cdot bz}{f} \quad \dots (7b)$$

$$bz = \frac{f^2}{2f - az} \quad \dots (7c)$$

[0045] 図2は、三次元像表示装置1から空間光変調素子11及びレンズ12を除いた光学系を説明する図である。表示再生像の輝点93a、93bそれぞれから発した球面波は、レンズ12の後焦点面にあるマスク13の開口部13Aを通過して、この開口部13Aの付近に配置されている観察者の眼の瞳に入射して、これにより、観察者は表示再生像を観察することができる。位置( $bx$ ,  $by$ ,  $bz$ )にある輝点から発した球面波がレンズ12の後焦点面に入射する方位と光軸とがなす角度 $\theta_m$ は、以下の式(8)で表される。

[数8]



$$\begin{aligned}\theta_m &= \tan^{-1}\left(\frac{bx}{bz}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{m \cdot p}{f}\right) \quad \dots (8)\end{aligned}$$

- [0046]  $bz$ は照明光波長 $\lambda$ の整数倍であるから、表示再生像の各輝点からレンズ12の後焦点位置までの光学的距離が略一定となる。したがって、レンズ12の後焦点位置において、表示再生像の各輝点から発した球面波が干渉して強め合うことになり、光強度が強くなる。また、近軸領域では、レンズ12の後焦点面上において、 $\lambda f/p$ のピッチで光強度が強くなる。複数の輝点で表示される三次元の表示再生像の場合、複数の輝点それぞれから発した球面波は、重なり合ってレンズ12の後焦点面に到達する。
- [0047] しかし、レンズ12の後焦点面に配置されたマスク13の作用により、0次光、不要な次数の回折波及び共役波が遮断されるだけでなく、上記のような干渉の結果として光強度が強くなる部分に到達する光も遮断される。したがって、マスク13の開口部13Aを通過して観察者の眼の瞳に入射する光の量は大幅に減少してしまう。特に、一様な輝度で模様がないような物体の再生像の場合、すなわち、低い空間周波数成分が支配的であるような再生像の場合、観察者が観察することができる再生像の光量が大幅に減少する。
- [0048] そこで、この発明に係る三次元像表示装置及び三次元像表示方法では、表示すべき目標再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の少なくとも何れか一方を、レンズ12の後焦点面において空間光変調素子11での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に到達する再生光のピークが複数箇所が発生するように設定することで、この目標再生像を表示し得るホログラムを空間光変調素子11に呈示させる。このようにすることにより、観察者の眼の瞳に到達する再生光のピーク位置が複数となり得て、観察者の眼の焦点調節機能を有効に働かせることができ、高品質の再生像を表示することができる。また、この発明に係る三次元像表示装置は簡易な構成で済む。
- [0049] 直接再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の双方又は何れか一

方を設定することで、直接再生像の各輝点のうち初期位相値が等しい輝点の間隔を、空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ の $N$ 倍( $N$ は2以上の整数)とする。このとき、近軸領域では、レンズ12の後焦点面上において、 $\lambda f/(Np)$ のピッチで光強度が強くなる。また、観察者の眼の瞳径を $d$ とする。瞳径 $d$ は、一般に個人差があり、しかも、入射光量により異なるが、例えば3mmである。このとき、観察者の眼の瞳に到達する再生光のピーク位置のピッチ( $\lambda f/(Np)$ )が瞳半径( $d/2$ )より小さければ、観察者の眼の瞳に到達する再生光のピーク位置が複数となる。

[0050] また、レンズ12の後焦点面において空間光変調素子11での特定次数の回折による再生像を観察し得る幅( $\lambda f/p$ )の領域の中に観察者の瞳が存在することが望ましい。以上より、空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ 、レンズ12の焦点距離 $f$ 、直接再生像の各輝点のうち初期位相値が等しい輝点の間隔 $Np$ 、照明光波長 $\lambda$ 及び観察者の眼の瞳径 $d$ の間に、以下の式(9)の関係が成り立つのが好ましい。特に、式(9)のうち右側の不等式の関係が満たされることが重要である。

[数9]

$$\frac{\lambda \cdot f}{p} > d > \frac{2\lambda \cdot f}{N \cdot p} \quad \dots (9)$$

[0051] マスク13の開口部13Aの付近に配置された観察者の眼から上記のような表示再生像を見ると、表示再生像の複数の輝点のうちで上記式(5a)式中の $m$ の値が0である輝点を見る方位と、該 $m$ 値が $N$ である輝点を見る方位とが、最も視角が大きい。この視角 $\theta_1$ は以下の式(10)で表される。

[数10]

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{N \cdot p}{f} \right) \quad \dots (10)$$

[0052] 一方、観察者の視力が1.0であるとする、その観察者は、距離10mだけ離れた位置にある大きさ3.0mmの物体を識別できると言われている。この場合の視角 $\theta_{\min}$ は以下の式(11)で表される。

[数11]

$$\theta_{\min} = \tan^{-1} \left( \frac{3.0}{10000} \right) = 0.017 \text{ deg} \quad \dots (11)$$

[0053] 上記式(10)で表される視角  $\theta_1$  が、上記式(11)で表される視角  $\theta_{\min}$  より小さければ、殆どの観察者の眼の分解能を上回る再生像が表示される。すなわち、以下の式(12)が満たされるのが好ましい。

[数12]

$$\frac{N \cdot p}{f} < \frac{3.0}{10000} \quad \dots (12)$$

[0054] 図3は、三次元像表示装置2の光学系を説明する図である。この図に示される三次元像表示装置2は、空間光変調素子11、凸レンズ12、マスク13、点光源14及びハーフミラー15を備える。なお、説明の便宜の為に、xyz直交座標系を設定して、z軸をレンズ12の光軸と一致させる。

[0055] この三次元像表示装置2で用いられる空間光変調素子11は反射型のものである。空間光変調素子11は、離散的画素構造を有しており、複数の画素が一定ピッチpで二次元配列されている。空間光変調素子11は、xy平面に平行に配置され、各画素に入射した光の振幅及び位相の双方又は何れか一方を変調して反射させ、その変調した光を出力する。

[0056] 点光源14、ハーフミラー15及びレンズ12は、空間光変調素子11に照明光を平行光として入射させる照明光学系を構成している。点光源14からハーフミラー15を経てレンズ12までの光学的距離は、レンズ12の焦点距離fと等しい。点光源14から発散して出射された照明光は、ハーフミラー15を透過してレンズ12に入射し、このレンズ12により平行光とされて、空間光変調素子11に入射する。

[0057] レンズ12及びハーフミラー15は、空間光変調素子11から発生した再生光を波面変換して虚像化し再生像を表示する再生像変換光学系を構成している。レンズ12からハーフミラー15を経てマスク13までの光学的距離は、レンズ12の焦点距離fと等しい。空間光変調素子11から発生した再生光は、レンズ12により波面変換され、ハーフミラー15により反射され、レンズ12の後焦点面にあるマスク13に到達する。マスク13の開口部13Aは、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のうち該領域内

に到達する再生光のうちピーク位置に到達する光成分を透過させる。また、開口部13Aは、0次光、不要な次数の回折波及び共役波を遮断する他、該領域の縁に到達する光線を遮断する。

[0058] 空間光変調素子11が振幅及び位相の双方を変調するものである場合には、共役波が発生しないので、空間光変調素子11の全域にホログラムを呈示させることができ、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のサイズを $\lambda f/p \times \lambda f/p$ とする。一方、空間光変調素子11が振幅及び位相の何れか一方のみを変調するものである場合には、空間光変調素子11の半平面のみにホログラムを呈示させて、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のサイズを $\lambda f/p \times \lambda f/(2p)$ とし、マスク13により共役波を遮断する。

[0059] 空間光変調素子11の各画素において光の振幅又は位相の変調度が設定されることで、空間光変調素子11にホログラムが呈示される。点光源14から出力されハーフミラー15を透過してレンズ12により平行光とされた照明光90は、ホログラムが呈示された空間光変調素子11に対してz軸に平行に入射する。空間光変調素子11に入射した照明光90は、各画素において振幅又は位相が変調される。この空間光変調素子11により画素毎に変調されて反射された光すなわち再生光は、直接再生像91を形成する。再生光は、レンズ12により波面変換されて虚像化され、再生像が形成される。そして、マスク13の開口部13Aの付近に眼の瞳を配置した観察者は、この開口部13A及びハーフミラー15を通して、表示再生像93を観察することができる。このとき、0次光、不要な次数の回折波及び共役波は、マスク13により遮断され、観察者の眼の瞳には入射しない。

[0060] この図3に示された三次元像表示装置2は、前に図1に示された三次元像表示装置1と比較すると、空間光変調素子11が透過型及び反射型の何れであるかの点で相違し、また、これに関連してハーフミラー15の有無の点でも相違する。しかし、これらの点で相違すると雖も、両者は実質的には同一の光学系であると言える。したがって、これまでに三次元像表示装置1(図1)について説明した事項は、三次元像表示装置2(図3)においても同様である。また、以下の説明は、三次元像表示装置1(図1)及び三次元像表示装置2(図3)の双方に共通である。



- [0061] また、以下では、空間光変調素子11が振幅及び位相の何れか一方のみを変調するものである場合について説明する。空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ を $8.1\mu\text{m}$ とし、レンズ12の焦点距離 $f$ を $40\text{mm}$ とし、点光源14をLEDとし、この点光源14から出力される照明光の波長 $\lambda$ を $650\text{nm}$ とする。また、マスク13の開口部13Aのサイズを、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のサイズと同じく、 $3.2\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ とする。以上のような前提の下に、比較例及び幾つかの実施例について以下に説明する。
- [0062] 初めに、比較例について説明する。図4は、比較例における直接再生像91の輝点間隔を説明する図である。図5は、比較例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明する図である。
- [0063] 図4は、直接再生像91の一部を光軸方向に見たときのものである。この図4において、空間光変調素子11の各画素の位置に対応する直接再生像91上の位置は、個々の最小単位の四角で示されている。直接再生像91における輝度値を有する輝点71の位置は、黒く塗り潰した四角で示されている。直接再生像91における輝度値分布の1周期分の範囲は、太線の矩形枠で示されている。
- [0064] 図5は、レンズ12の後焦点面に配置されたマスク13を光軸方向に見たときのものである。この図5において、観察すべき再生光を透過させる開口部13Aの縁は、実線の矩形枠で示されている。開口部13Aに到達する再生光に対して共役な波面が到達する領域の範囲は、破線の矩形枠で示されている。0次光が到達する位置81は、中央の黒丸で示されている。到達する再生光のピーク位置は、黒丸で示されている。
- [0065] なお、ここで図4及び図5の見方について説明した事項は、後に説明する類似の図においても同様である。
- [0066] 比較例では、空間光変調素子11から直接的に再生される直接再生像91において輝度値を有する輝点71は、図4に示されるように、 $x$ 軸方向及び $y$ 軸方向それぞれについて $2p$ のピッチ（空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ の2倍）で周期的に配置されている。また、これら輝度値を有する輝点71の初期位相値は一定である。
- [0067] このとき、レンズ12の後焦点面に到達する光のピークは、図5に示されるように、 $x$ 軸方向及び $y$ 軸方向それぞれについて $1.6\text{mm} (= \lambda f / (2p))$ のピッチで周期的に位

置しており、マスク13の開口部13Aの縁に存在するが、開口部13A内(縁を除く)には存在しない。したがって、この比較例では、開口部13Aの付近に眼を配置する観察者は、低い空間周波数成分が支配的である再生像を観察することが困難である。

[0068] 次に、第1実施例について説明する。図6は、第1実施例における直接再生像91の輝点間隔を説明する図である。図7は、第1実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明する図である。

[0069] 第1実施例では、空間光変調素子11から直接的に再生される直接再生像91において輝度値を有する輝点71は、図6に示されるように、x軸方向及びy軸方向それぞれについて4pのピッチ(空間光変調素子11の画素ピッチpの4倍)で周期的に配置されている。また、これら輝度値を有する輝点71の初期位相値は一定である。

[0070] このとき、第1実施例の場合のレンズ12の後焦点面に到達する光のピークは、図7に示されるように、x軸方向及びy軸方向それぞれについて $0.8\text{mm}(=\lambda f/(4p))$ のピッチで周期的に位置しており、そのうち、3点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A内(縁を除く)に存在する。この開口部13A内の3点の光ピーク位置それぞれは、空間光変調素子11での特定次数の回折による再生光のピーク位置であって、x軸方向に配列されている。これら3点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光は、各位置に対応した視差画像成分を含んでいる。

[0071] したがって、この第1実施例では、開口部13Aの付近に眼を配置する観察者は、これら3点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することで、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。それ故、眼の焦点が外れている場合にはx軸方向に3画像がずれて、x軸方向について自然なボケのある再生像を観察することができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。

[0072] 次に、第2実施例について説明する。図8は、第2実施例における直接再生像91の輝点間隔を説明する図である。図9は、第2実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明する図である。

[0073] 第2実施例では、空間光変調素子11から直接的に再生される直接再生像91において輝度値を有する輝点71は、図8に示されるように、x軸方向について4pのピッチ

(空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ の4倍)で周期的に配置されており、 $y$ 軸方向について $6p$ のピッチ(空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ の6倍)で周期的に配置されている。また、これら輝度値を有する輝点71の初期位相値は一定である。

[0074] このとき、第2実施例の場合のレンズ12の後焦点面に到達する光のピークは、図9に示されるように、 $x$ 軸方向について $0.8\text{mm}(=\lambda f/(4p))$ のピッチで周期的に位置し、 $y$ 軸方向について $0.53\text{mm}(=\lambda f/(6p))$ のピッチで周期的に位置しており、そのうち、6点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A内(縁を除く)に存在する。この開口部13A内の6点の光ピーク位置それぞれは、空間光変調素子11での特定次数の回折による再生光のピーク位置であって、 $x$ 軸方向に3列、 $y$ 軸方向に2行、配列されている。これら6点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光は、各位置に対応した視差画像成分を含んでいる。

[0075] したがって、この第2実施例では、開口部13Aの付近に眼を配置する観察者は、これら6点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することで、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。それ故、眼の焦点が外れている場合には、 $x$ 軸方向に3画像がずれ、 $y$ 軸方向に2画像がずれて、 $x$ 軸方向及び $y$ 軸方向の双方について自然なボケのある再生像を観察することができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。

[0076] 次に、第3実施例について説明する。図10は、第3実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明する図である。

[0077] この図10の見方は、図4等の場合と同様である。加えて、直接再生像91における輝度値を有する輝点71の初期位相値が、黒く塗り潰した四角の中の数字で示されている。数字「0」は初期位相値の基準値を示し、数字「1」は初期位相値が「基準値 $+\pi/2$ 」であることを示し、数字「2」は初期位相値が「基準値 $+\pi$ 」であることを示し、また、数字「3」は初期位相値が「基準値 $+3\pi/2$ 」であることを示す。

[0078] 第3実施例では、空間光変調素子11から直接的に再生される直接再生像91において輝度値を有する輝点71は、比較例と同様に、 $x$ 軸方向及び $y$ 軸方向それぞれについて $2p$ のピッチ(空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ の2倍)で周期的に配置されている。また、輝度値を有する輝点71の初期位相値は、 $x$ 軸方向及び $y$ 軸方向それぞれ

れについて $4p$ のピッチ(空間光変調素子11の画素ピッチ $p$ の4倍)で周期的に設定されている。太線の矩形枠で示されている初期位相値分布の1周期分の範囲では、輝度値を有する輝点71の初期位相値は互いに異なる。

- [0079] このとき、レンズ12の後焦点面に到達する光のピークの配置の周期性は、直接再生像91における輝点71の配置及び初期位相値の双方を総合した周期性を反映したものとなる。すなわち、第3実施例の場合のレンズ12の後焦点面に到達する光のピークは、前述の図7に示された第1実施例の場合と同様に、 $x$ 軸方向及び $y$ 軸方向それぞれについて $0.8\text{mm}(=\lambda f/(4p))$ のピッチで周期的に位置しており、そのうち、3点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A内(縁を除く)に存在する。この開口部13A内の3点の光ピーク位置それぞれは、空間光変調素子11での特定次数の回折による再生光のピーク位置であって、 $x$ 軸方向に配列されている。これら3点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光は、各位置に対応した視差画像成分を含んでいる。
- [0080] したがって、この第3実施例では、開口部13Aの付近に眼を配置する観察者は、これら3点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することで、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。それ故、眼の焦点が外れている場合には $x$ 軸方向に3画像がずれて、 $x$ 軸方向について自然なボケのある再生像を観察することができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。
- [0081] さらに、第1実施例の場合と比較すると、この第3実施例では、3点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A内(縁を除く)に存在する点で同じである一方で、直接再生像91における輝度値を有する輝点71の個数が4倍であるので、観察者は高解像度で明るい再生像を観察することができる。
- [0082] 次に、第4実施例について説明する。図11は、第4実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明する図である。
- [0083] この図11の見方は、図4等の場合と同様である。加えて、直接再生像91における輝度値を有する輝点71の初期位相値が、黒く塗り潰した四角の中の数字で示されている。数字「0」は初期位相値の基準値を示し、数字「1」は初期位相値が「基準値+



$\pi/3$ 」であることを示し、数字「2」は初期位相値が「基準値 +  $2\pi/3$ 」であることを示し、数字「3」は初期位相値が「基準値 +  $\pi$ 」であることを示し、数字「3」は初期位相値が「基準値 +  $4\pi/3$ 」であることを示し、また、数字「3」は初期位相値が「基準値 +  $5\pi/3$ 」であることを示す。

[0084] 第4実施例では、空間光変調素子11から直接的に再生される直接再生像91において輝度値を有する輝点71は、比較例と同様に、x軸方向及びy軸方向それぞれについて2pのピッチ（空間光変調素子11の画素ピッチpの2倍）で周期的に配置されている。また、輝度値を有する輝点71の初期位相値は、x軸方向について4pのピッチ（空間光変調素子11の画素ピッチpの4倍）で周期的に設定されており、y軸方向について6pのピッチ（空間光変調素子11の画素ピッチpの6倍）で周期的に設定されている。太線の矩形枠で示されている初期位相値分布の1周期分の範囲では、輝度値を有する輝点71の初期位相値は互いに異なる。

[0085] このとき、レンズ12の後焦点面に到達する光のピークの配置の周期性は、直接再生像91における輝点71の配置及び初期位相値の双方を総合した周期性を反映したものとなる。すなわち、第4実施例の場合のレンズ12の後焦点面に到達する光のピークは、前述の図9に示された第2実施例の場合と同様に、x軸方向について $0.8\text{mm}(=\lambda f/(4p))$ のピッチで周期的に位置し、y軸方向について $0.53\text{mm}(=\lambda f/(6p))$ のピッチで周期的に位置しており、そのうち、6点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A内（縁を除く）に存在する。この開口部13A内の6点の光ピーク位置それぞれは、空間光変調素子11での特定次数の回折による再生光のピーク位置であって、x軸方向に3列、y軸方向に2行、配列されている。これら6点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光は、各位置に対応した視差画像成分を含んでいる。

[0086] したがって、この第4実施例では、開口部13Aの付近に眼を配置する観察者は、これら6点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することで、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。それ故、眼の焦点が外れている場合には、x軸方向に3画像がずれ、y軸方向に2画像がずれて、x軸方向及びy軸方向の双方について自然なボケのある再生像を観察することができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。

- [0087] さらに、第2実施例の場合と比較すると、この第4実施例では、6点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A内(縁を除く)に存在する点で同じである一方で、直接再生像91における輝度値を有する輝点71の個数が6倍であるので、観察者は高解像度で明るい再生像を観察することができる。
- [0088] 次に、第5実施例について説明する。図12は、第5実施例における直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値を説明する図である。図13は、第5実施例におけるレンズ12の後焦点面に到達する光のピーク位置を説明する図である。
- [0089] この図12の見方は、図4等の場合と同様である。加えて、直接再生像91における輝度値を有する輝点71の初期位相値が、黒く塗り潰した四角の中の数字で示されている。数字「0」は初期位相値の基準値を示し、数字「1」は初期位相値が「基準値 +  $\pi/2$ 」であることを示し、数字「2」は初期位相値が「基準値 +  $\pi$ 」であることを示し、また、数字「3」は初期位相値が「基準値 +  $3\pi/2$ 」であることを示す。
- [0090] 第5実施例では、空間光変調素子11から直接的に再生される直接再生像91において輝度値を有する輝点71は、比較例と同様に、x軸方向及びy軸方向それぞれについて2pのピッチ(空間光変調素子11の画素ピッチpの2倍)で周期的に配置されている。また、輝度値を有する輝点71の初期位相値は、x軸方向について4pのピッチで周期的に設定されており、y軸方向について8pのピッチで周期的に設定されており、また、ベクトル( $\pm 2p, \pm 4p$ )の方向についても $20^{1/2}p(=((2p)^2+(4p)^2)^{1/2})$ のピッチで周期的に設定されている。太線の矩形枠で示されている初期位相値分布の1周期分の範囲では、輝度値を有する輝点71は、初期位相値が同一のものが2つずつ存在する。
- [0091] このとき、レンズ12の後焦点面に到達する光のピークの配置の周期性は、直接再生像91における輝点71の配置及び初期位相値の双方を総合した周期性を反映したものとなる。すなわち、第5実施例の場合のレンズ12の後焦点面に到達する光のピークは、図13に示されるように、x軸方向について $1.6\text{mm}(=\lambda f/(4p))$ のピッチで周期的に位置し、y軸方向について $0.8\text{mm}(=\lambda f/(8p))$ のピッチで周期的に位置し、また、ベクトル( $\pm 2, \pm 1$ )の方向についても $0.89\text{mm}(=((0.8)^2+(0.4)^2)^{1/2})$ のピッチで周期的に位置する。そのうち、5点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A

内(縁を除く)に存在する。この開口部13A内の5点の光ピーク位置それぞれは、空間光変調素子11での特定次数の回折による再生光のピーク位置であって、開口部13Aの中央にある光ピーク位置82の周囲を他の4点の光ピーク位置が取り囲んでいる。これら5点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光は、各位置に対応した視差画像成分を含んでいる。

[0092] したがって、この第5実施例では、開口部13Aの付近に眼を配置する観察者は、これら5点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することで、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。それ故、眼の焦点が外れている場合には、x軸方向及びy軸方向の双方について自然なボケのある再生像を観察することができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。また、第1実施例の場合と比較すると、直接再生像91における輝度値を有する輝点71の個数が4倍であるので、観察者は高解像度で明るい再生像を観察することができる。

[0093] 次に、第6実施例について説明する。第6実施例では、目標再生像91を構成する各輝点71の初期位相値を時間的に変化させる。具体的には、既に図10に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布と、図14に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布とを、時間的に交互に設定する。一方の分布に対して、他方の分布はx軸方向に距離2pだけ平行移動したものに相当する。

[0094] 或いは、図12に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布と、図15に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布と、図16に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布と、図17に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布とを、時間的に順次に繰り返して設定する。このようにすることにより、より鮮明な再生像が表示され得る。或る1つの分布に対して、他の分布は、x軸方向に距離2pだけ平行移動したもの、y軸方向に距離2pだけ平行移動したもの、x軸方向及びy軸方向それぞれに距離2pだけ平行移動したもの、の何れかに相当する。

[0095] 図10に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布のみを設定した場合、或いは、図12に示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布の

みを設定した場合には、空間光変調素子11に照射される照明光がコヒーレント光であることから、マスク13の開口部13Aで観察される再生像には、周期構造を有する干渉縞パターンが重畳される。このことから、観察される再生像の画素数が減少する。

[0096] しかし、この第6実施例では、図10及び図14それぞれに示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布を時間的に交互に設定することにより、或いは、図12及び図15ー図17それぞれに示した直接再生像91の輝点間隔及び初期位相値の分布を時間的に順次に繰り返して設定することにより、再生像に重畳される干渉縞パターンは、各時点での初期位相値分布に応じたものとなり、時間的に相殺される。このことから、干渉縞パターンの影響が低減されて、より鮮明な再生像が表示され得る。

[0097] 次に、第7実施例について説明する。第7実施例では、これまでに説明した比較例及び各実施例と比較して、レンズ12の焦点距離 $f$ を120mmとする点で異なる。この場合、マスク13の開口部13Aのサイズは、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のサイズと同じく、9.6mm×4.8mmとなる。観察者の眼の瞳径が3mm程度であるから、マスク13の開口部13Aのサイズより観察者の眼の瞳径が小さい。このような場合にも、複数の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳に同時に入射することが必要である。

[0098] そこで、第7実施例では、空間光変調素子11から直接的に再生される直接再生像91において輝度値を有する輝点71は、x軸方向及びy軸方向それぞれについて4pのピッチ(空間光変調素子11の画素ピッチpの4倍)で周期的に配置される。また、これら輝度値を有する輝点71の初期位相値は、x軸方向及びy軸方向それぞれについて8pのピッチ(空間光変調素子11の画素ピッチpの8倍)で周期的に配置される。

[0099] このとき、第7実施例の場合のレンズ12の後焦点面に到達する光のピークは、図18に示されるように、x軸方向及びy軸方向それぞれについて $1.2\text{mm}(=\lambda f/(8p))$ のピッチで周期的に位置しており、そのうち、21点の光ピーク位置がマスク13の開口部13A内(縁を除く)に存在する。この開口部13A内の21点の光ピーク位置それぞれは、空間光変調素子11での特定次数の回折による再生光のピーク位置であって、x軸方向に7列、y軸方向に3行、配列されている。これら21点の光ピーク位置それ



ぞれの近傍に分布する再生光は、各位置に対応した視差画像成分を含んでいる。

[0100] したがって、この第7実施例では、開口部13Aの付近に眼を配置する観察者は、上記21点のうち5点の光ピーク位置それぞれの近傍に分布する再生光を眼の瞳(図中の破線の円)に同時に入射することで、眼の焦点調節機能を有効に働かせることができる。それ故、眼の焦点が外れている場合には、x軸方向及びy軸方向の双方について自然なボケのある再生像を観察することができる。また、低い空間周波数成分が支配的である再生像をも良好に観察することができる。

[0101] 次に、第8実施例について説明する。第8実施例では、これまでに説明した各実施例と比較して、マスク13の開口部13Aの形状に特徴を有している。本実施例におけるマスク13は、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域( $\lambda f/p$ ,  $\lambda f/(2p)$ )のうち該領域内に到達する再生光のうちピーク位置に到達する光成分を透過させる一方、0次光、不要な次数の回折波及び共役波を遮断するとともに、該領域の縁に到達する光線を遮断するというだけでなく、該領域内に到達する特定次数以外の他の次数の回折による再生光を遮断する。

[0102] 例えば、既に説明した第5実施例(図12、図13)の如く、特定次数の回折による再生像を観察し得る領域(縁を除く)に5点の光ピーク位置が存在する場合、図19に示されるように、それら5点それぞれを中心とする円形領域を開口部13Aとする。或いは、図20に示されるように、それら5点それぞれを中心とする菱形領域(隣合う2つの菱形が互いに接していてもよい)を開口部13Aとする。

[0103] このような開口部13Aの形状とすることにより、領域( $\lambda f/p$ ,  $\lambda f/(2p)$ )のうち該領域の縁に到達する光線のピーク位置の周辺の特定次数以外の他の次数の回折による再生光が遮断されて、より鮮明な再生像が観察され得る。

[0104] 以上の本発明の説明から、本発明を様々に変形しうることは明らかである。そのような変形は、本発明の思想及び範囲から逸脱するものとは認めることはできず、すべての当業者にとって自明である改良は、以下の請求の範囲に含まれるものである。

#### 産業上の利用可能性

[0105] この発明は、ホログラムを呈示した空間光変調素子に照明光を入射させて三次元再生像の表示を可能にする装置及び方法に適用可能である。

## 請求の範囲

- [1] 離散的画素構造を有しホログラムを呈示する空間光変調素子と、前記ホログラムを呈示した前記空間光変調素子に照明光を入射させて再生光を発生させる照明光学系と、この再生光を波面変換して虚像化し再生像を表示する再生像変換光学系とを備え、
- 表示すべき目標再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の少なくとも何れか一方は、前記再生像変換光学系の後焦点面において前記空間光変調素子での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に到達する再生光のピークが複数箇所に発生するよう設定された三次元像表示装置。
- [2] 請求項1記載の三次元像表示装置において、
- 前記目標再生像を構成する各輝点の初期位相値は、時間経過とともに変化させられる。
- [3] 請求項1記載の三次元像表示装置は、さらに、
- 前記再生像変換光学系の後焦点面に設けられマスクであって、前記特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のうち該領域内に到達する再生光のうちピーク位置に到達する光成分を透過させる一方、前記特定次数以外の他の次数の回折による光成分を遮断するマスクを備える。
- [4] 離散的画素構造を有する空間光変調素子にホログラムを呈示し、この空間光変調素子に照明光を入射させて再生光を発生させ、この再生光を再生像変換光学系により波面変換して虚像化し再生像を表示する三次元像表示方法であって、
- 表示すべき目標再生像を構成する各輝点の輝点間隔及び初期位相値の少なくとも何れか一方を、前記再生像変換光学系の後焦点面において前記空間光変調素子での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に到達する再生光のピークが複数箇所に発生するよう設定することで、該目標再生像を表示し得るホログラムを前記空間光変調素子に呈示させる三次元像表示方法。
- [5] 請求項4記載の三次元像表示方法において、
- 前記目標再生像を構成する各輝点の初期位相値は、時間経過とともに変化させられる。

[6] 請求項4記載の三次元像表示方法において、

前記特定次数の回折による再生像を観察し得る領域のうち該領域内に到達する再生光のうちピーク位置に到達する光成分を透過させる一方、前記特定次数以外の他の次数の回折による光成分を遮断するマスクを、前記再生像変換光学系の後焦点面に配置し、

前記マスクを通過した光成分により再生像を表示させる。

[7] 請求項4記載の三次元像表示方法において、

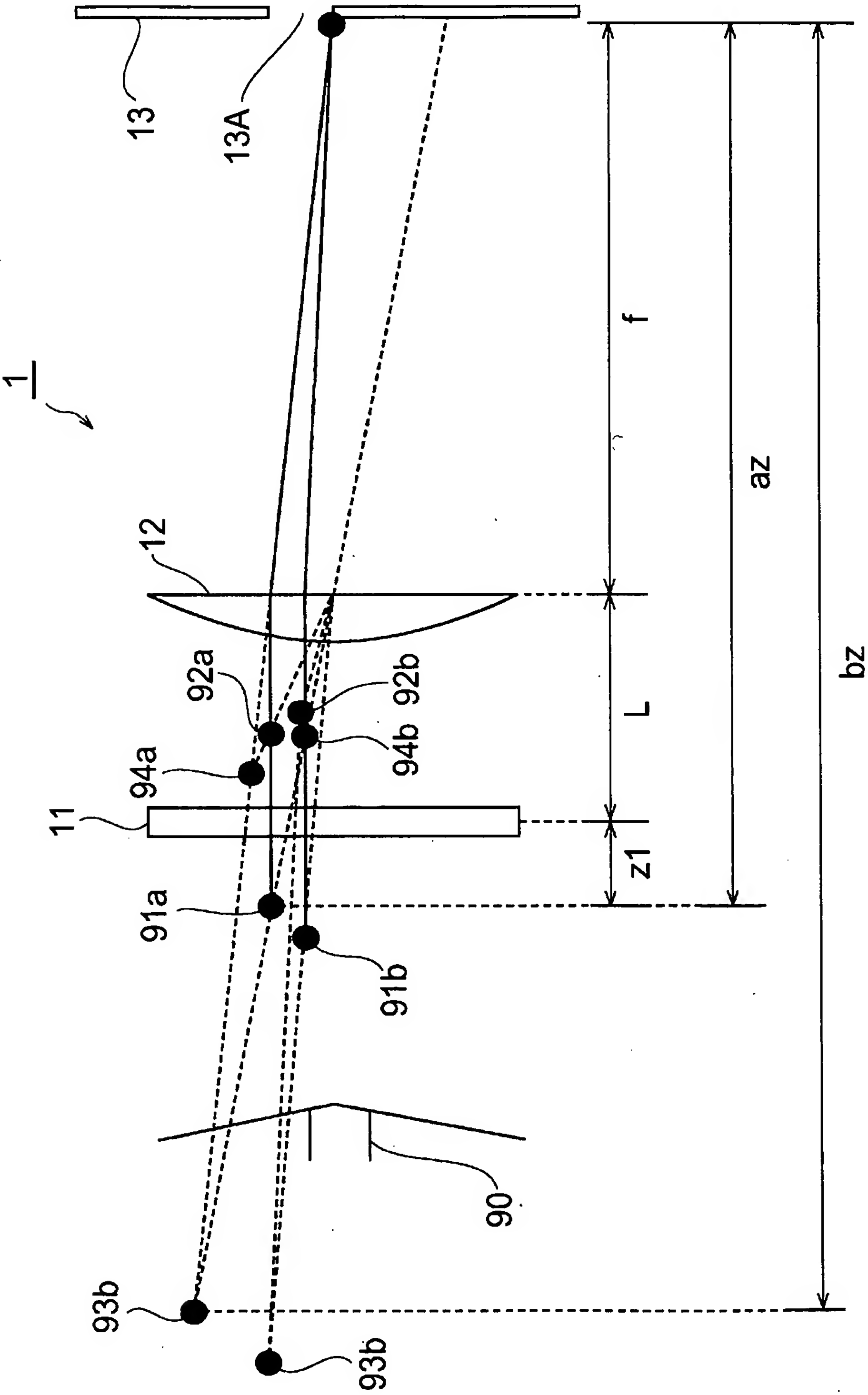
前記再生像変換光学系の後焦点面において前記空間光変調素子での特定次数の回折による再生像を観察し得る領域内に到達する再生光のピーク位置の間隔は、前記再生像を観察する観察者の瞳の径より小さい。

[8] 請求項4記載の三次元像表示方法において、

前記照明光の波長を $\lambda$ とし、前記再生像変換光学系の焦点距離を $f$ とし、前記空間光変調素子の画素ピッチを $p$ とし、前記再生像を観察する観察者の瞳の径を $d$ とし、前記目標再生像を構成する各輝点のうち初期位相値が等しい輝点の間隔を $Np$  ( $N$ は2以上の整数)とするとき、以下の関係が満たされている。

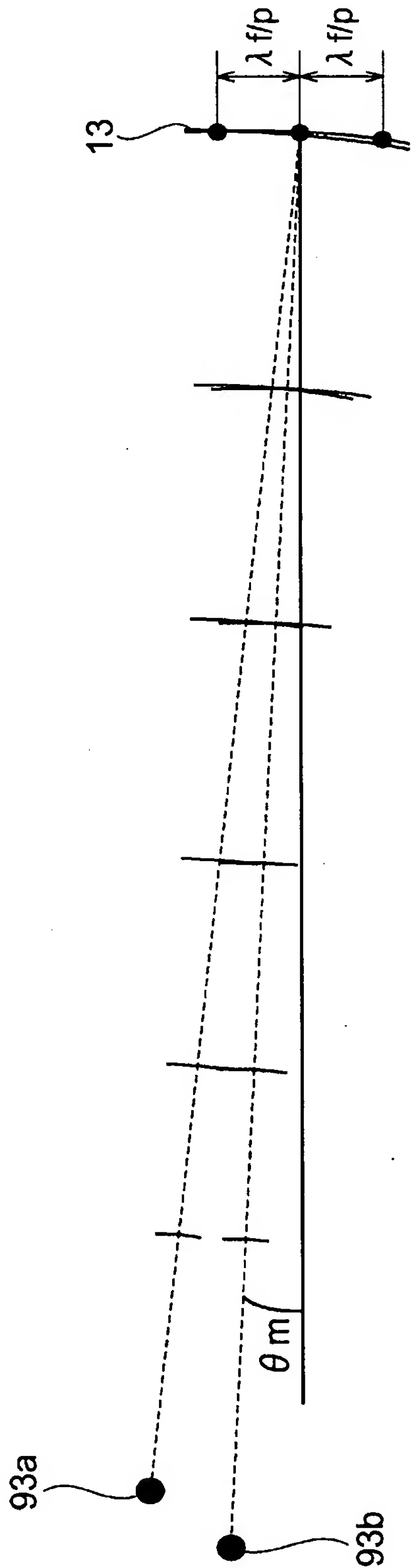
$$d/2 > \lambda f / (Np)$$

[図1]

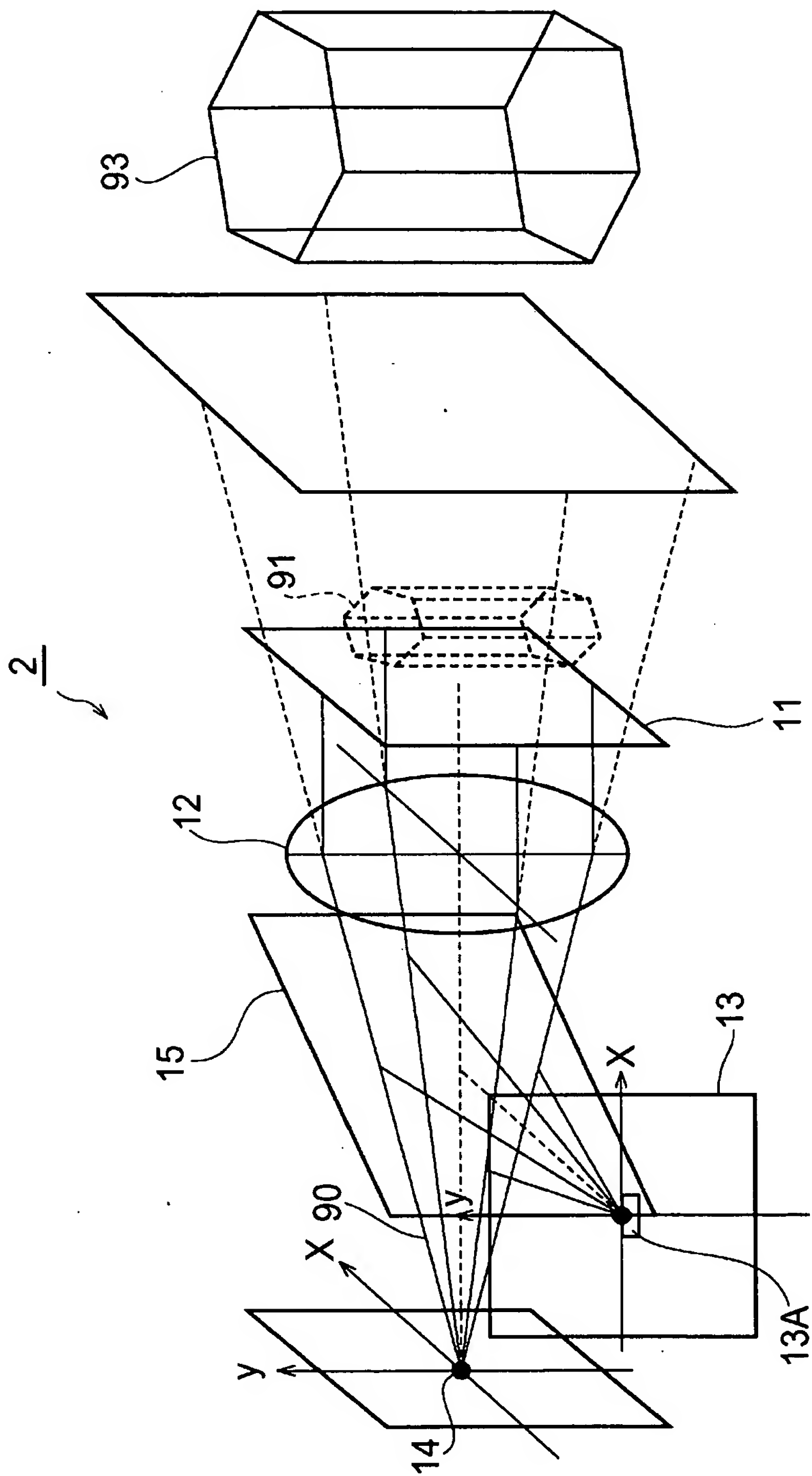




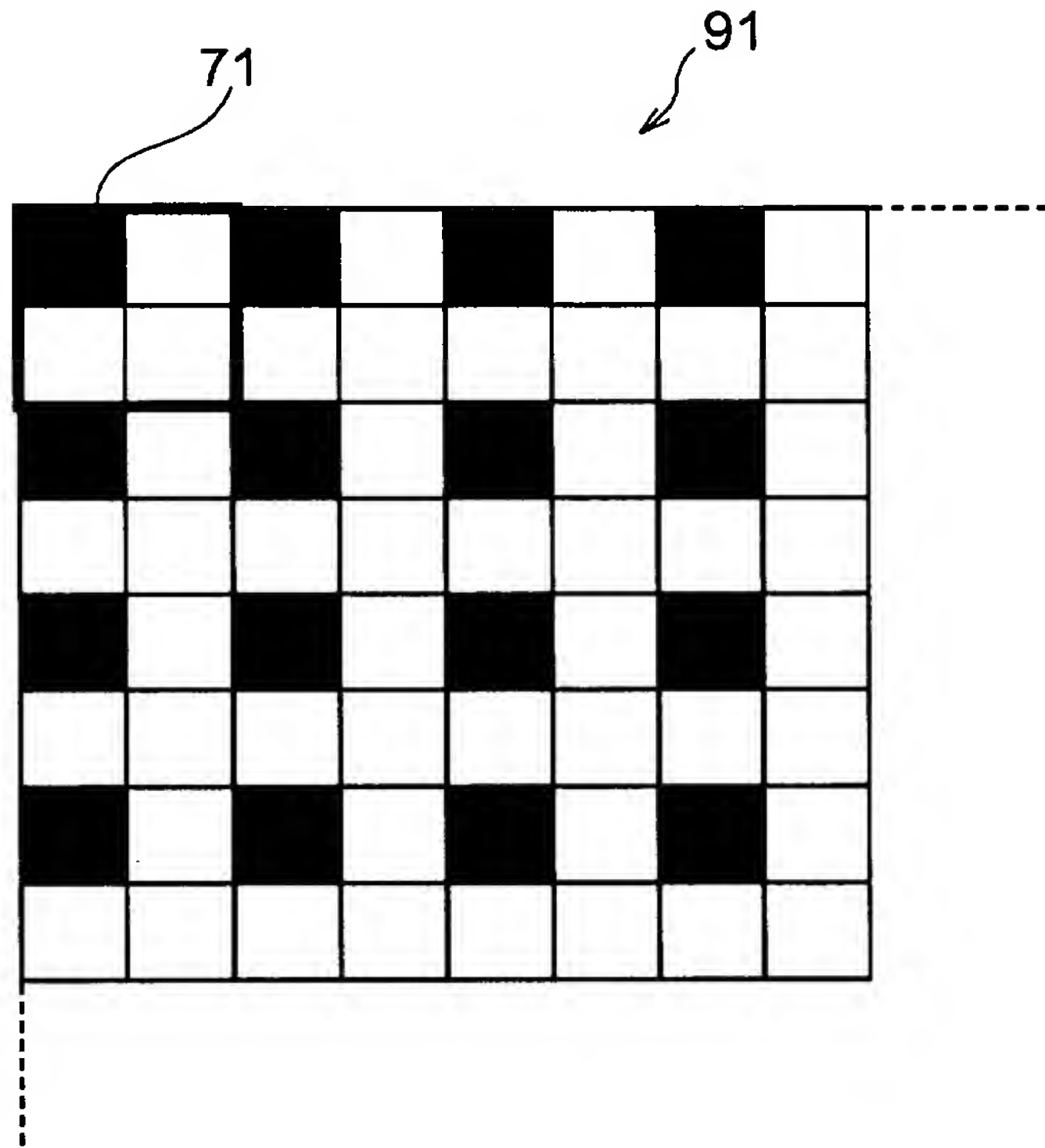
[図2]



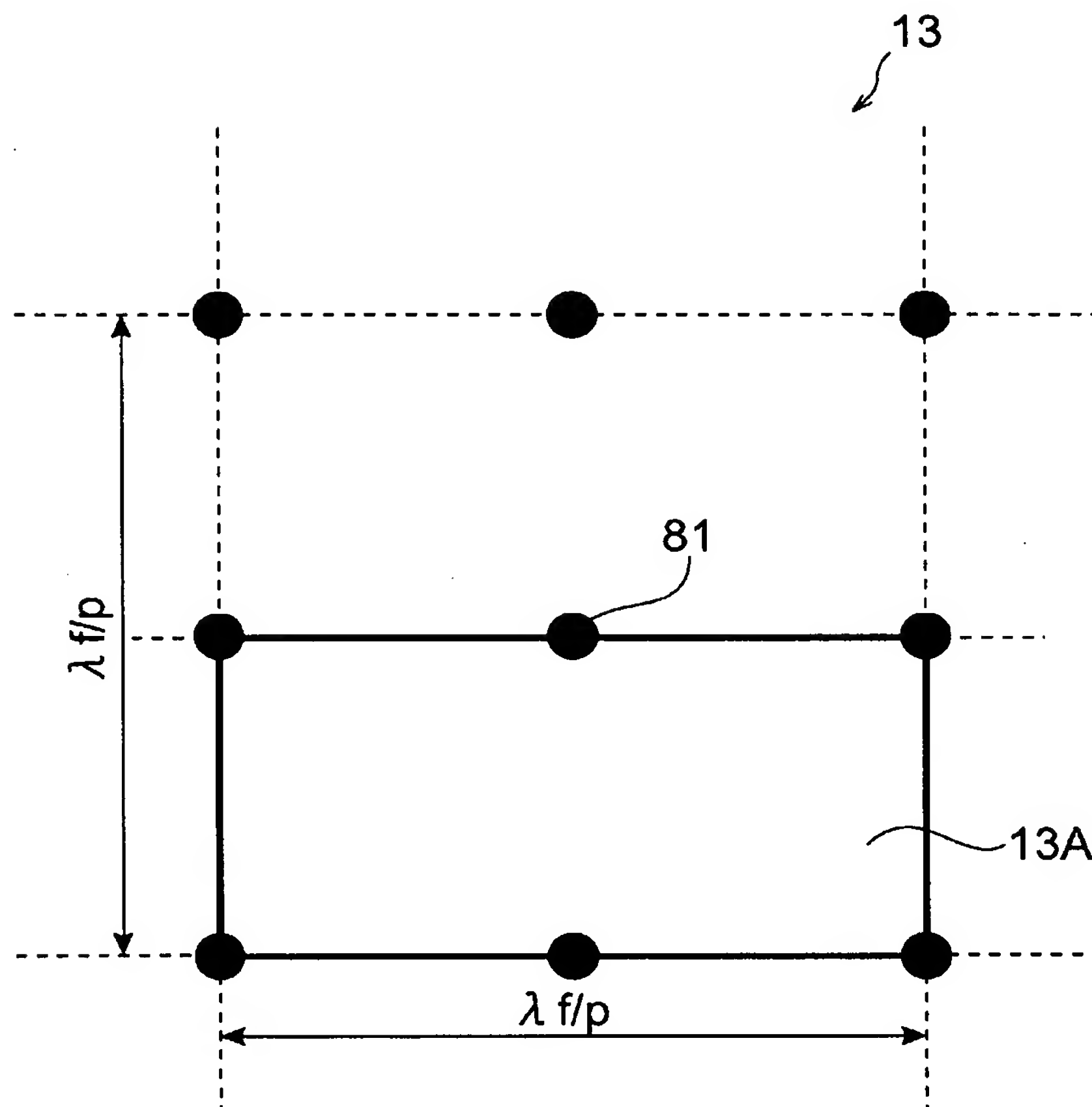
[図3]



[図4]

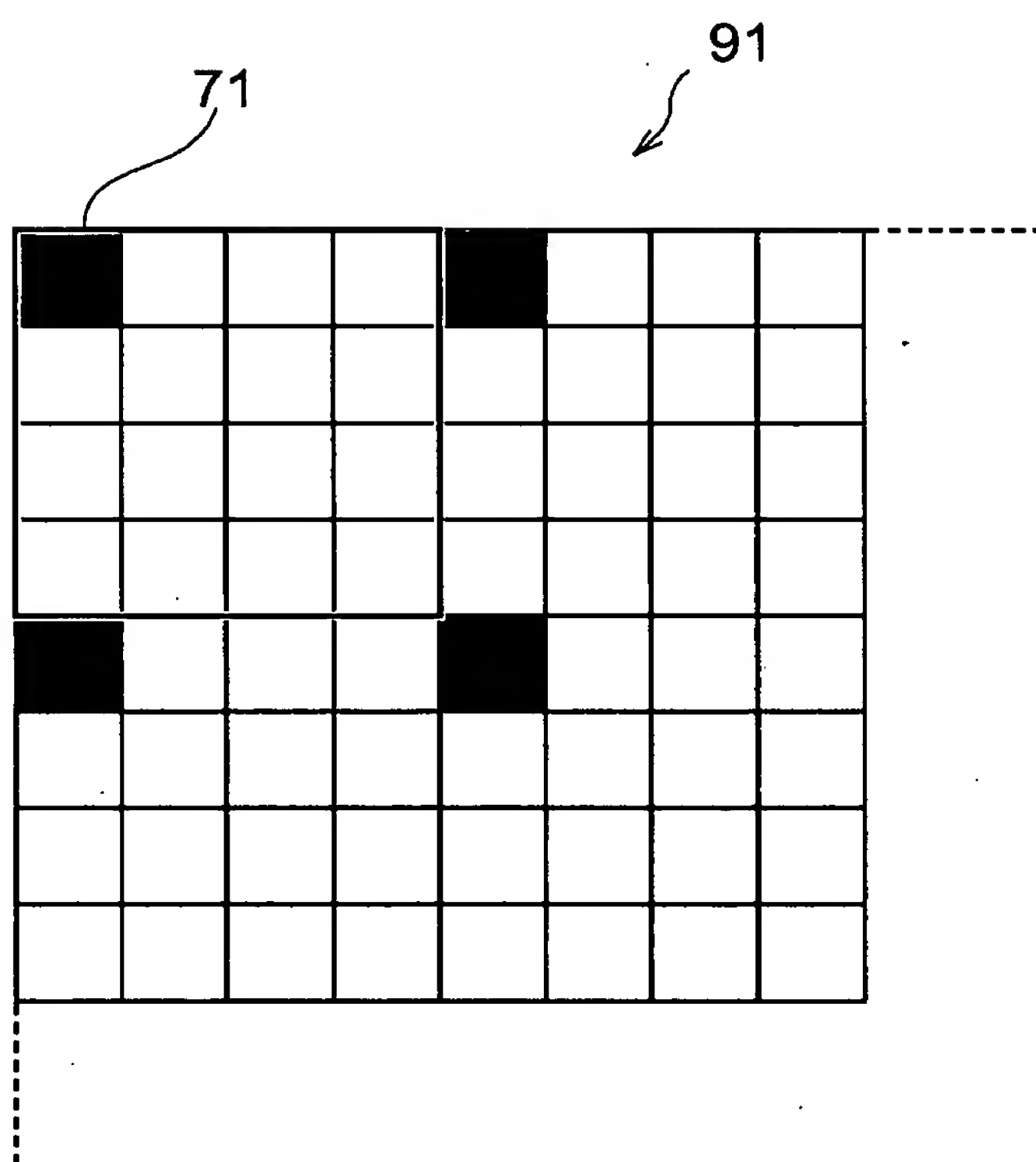


[図5]

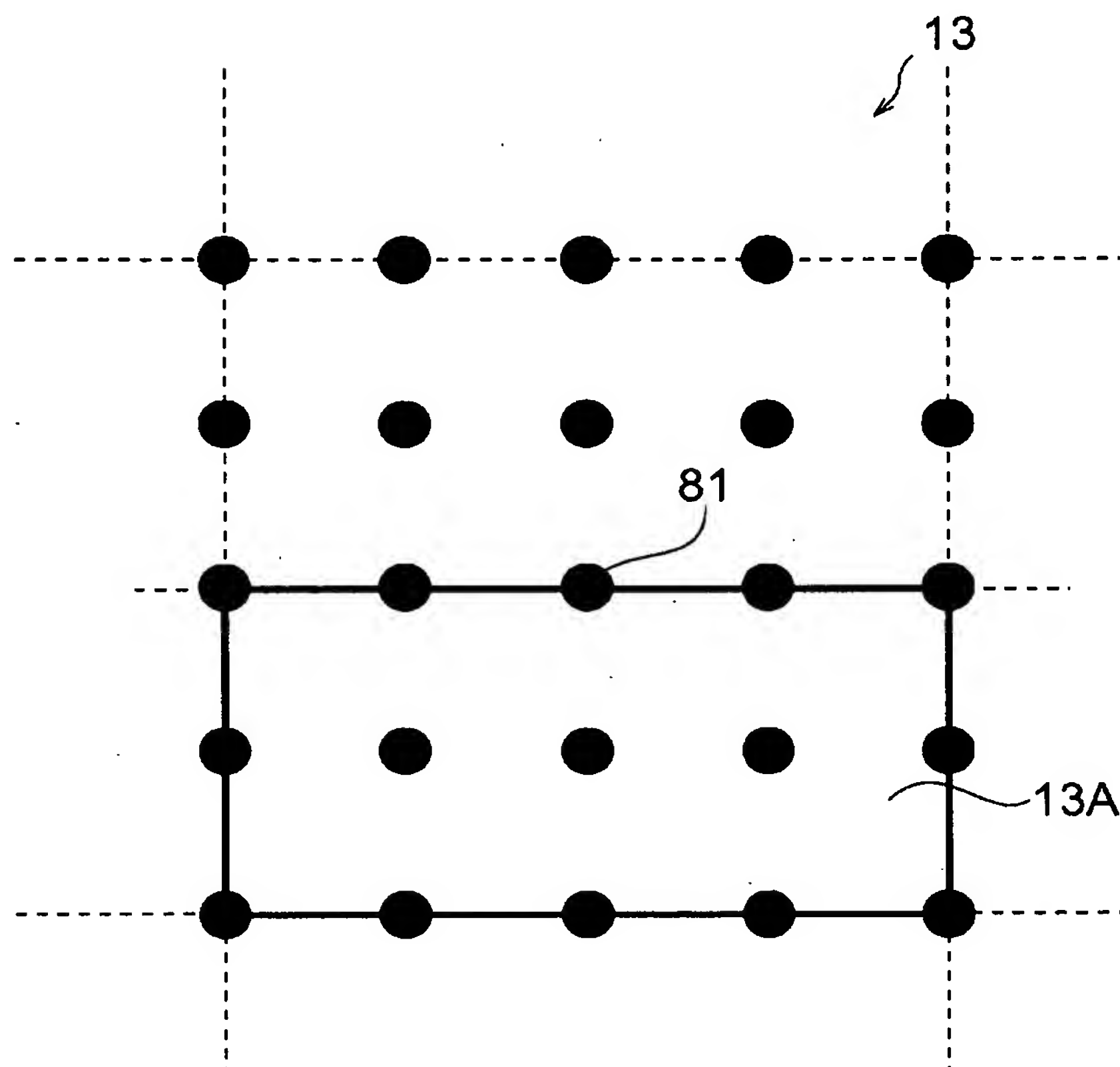




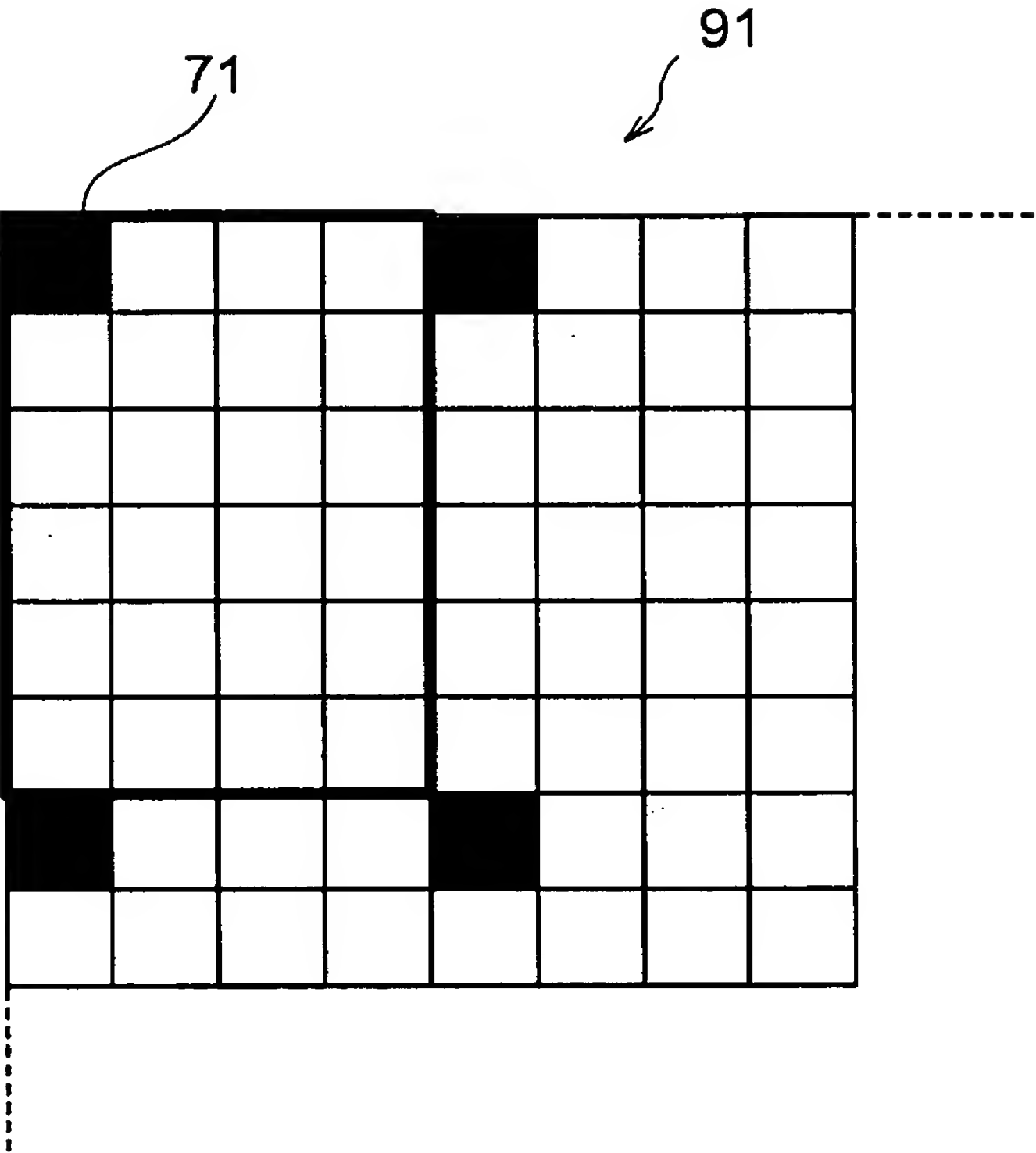
[図6]



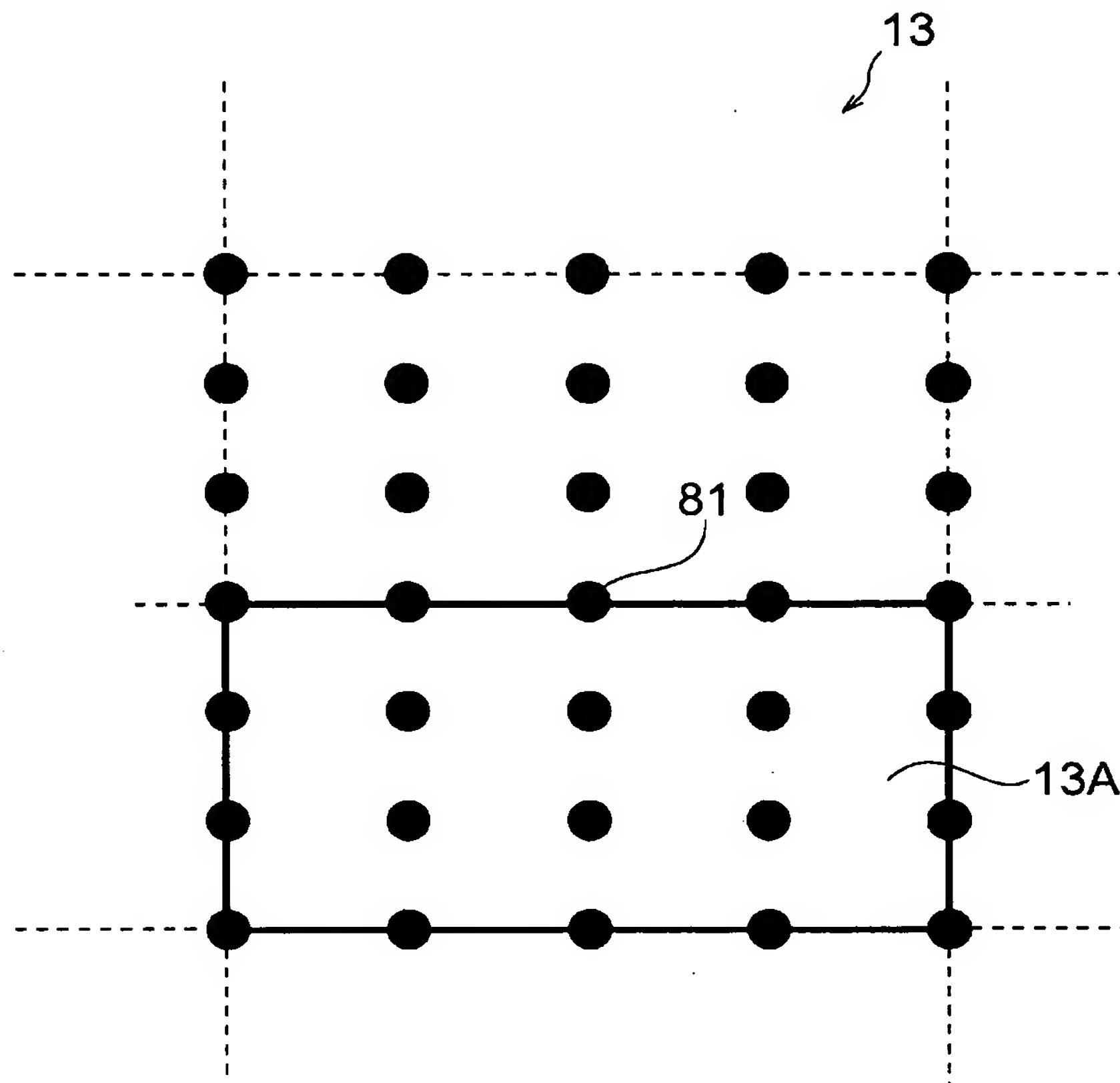
[図7]



[図8]

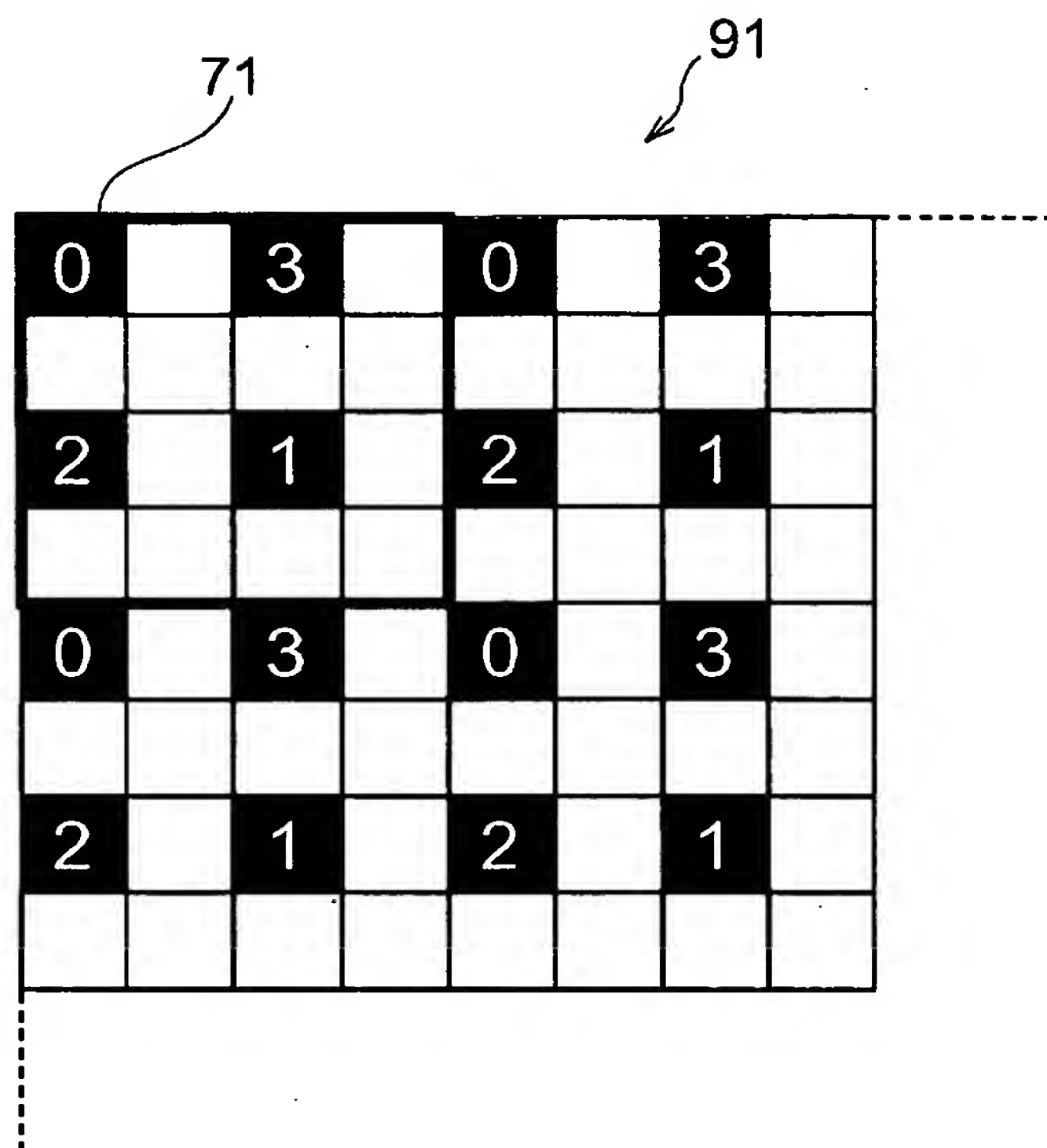


[図9]





[図10]



[図11]

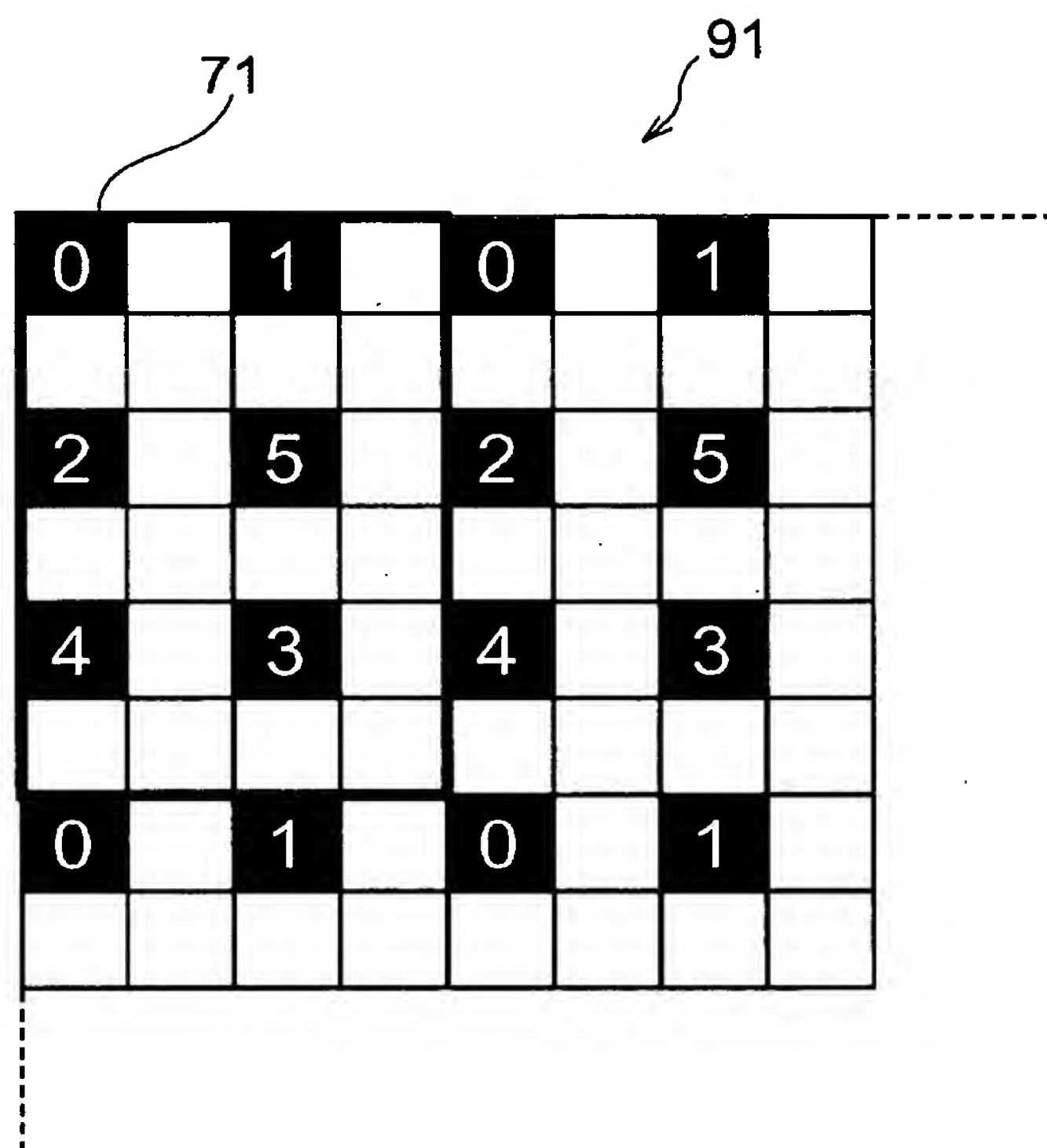
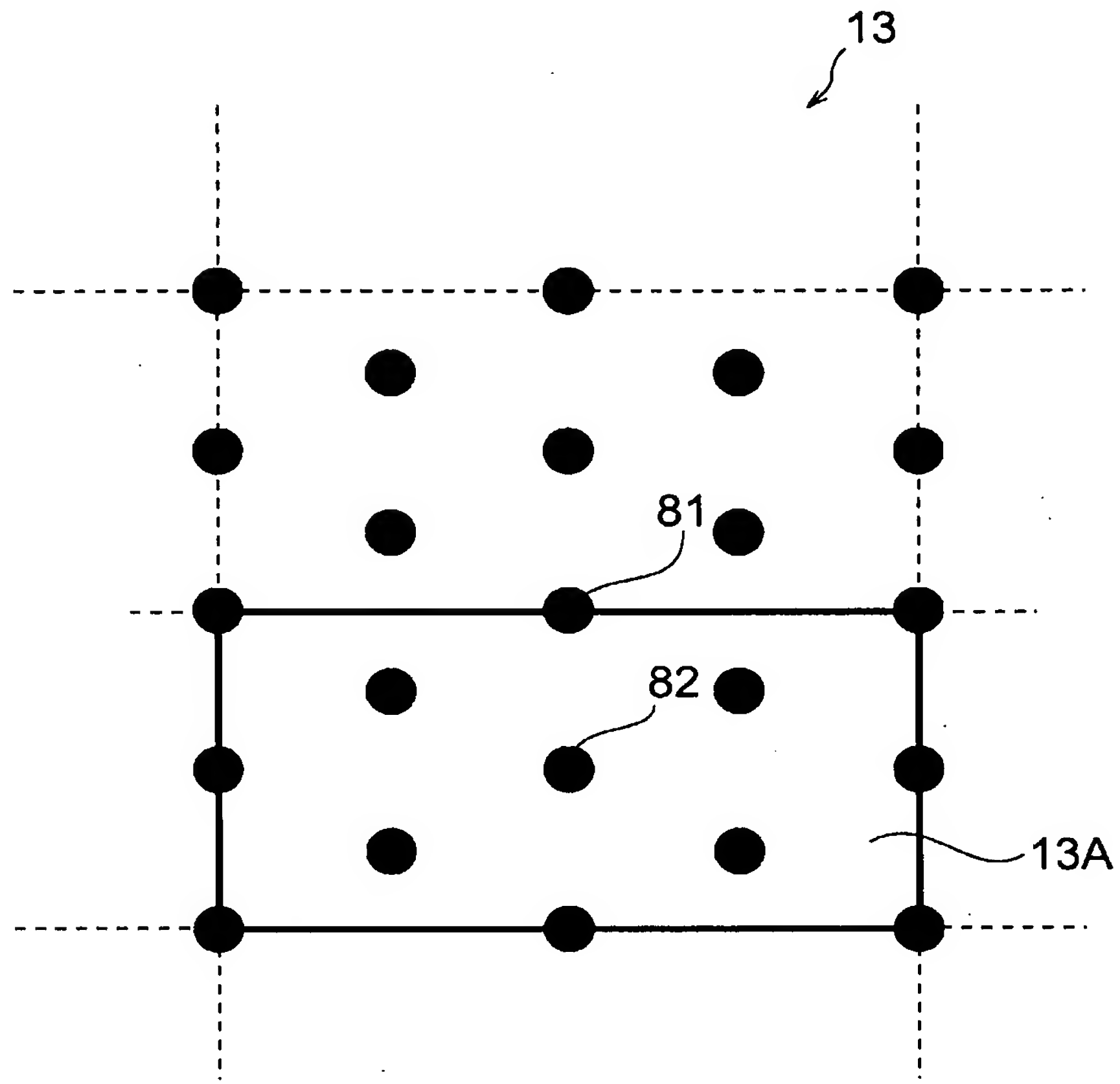


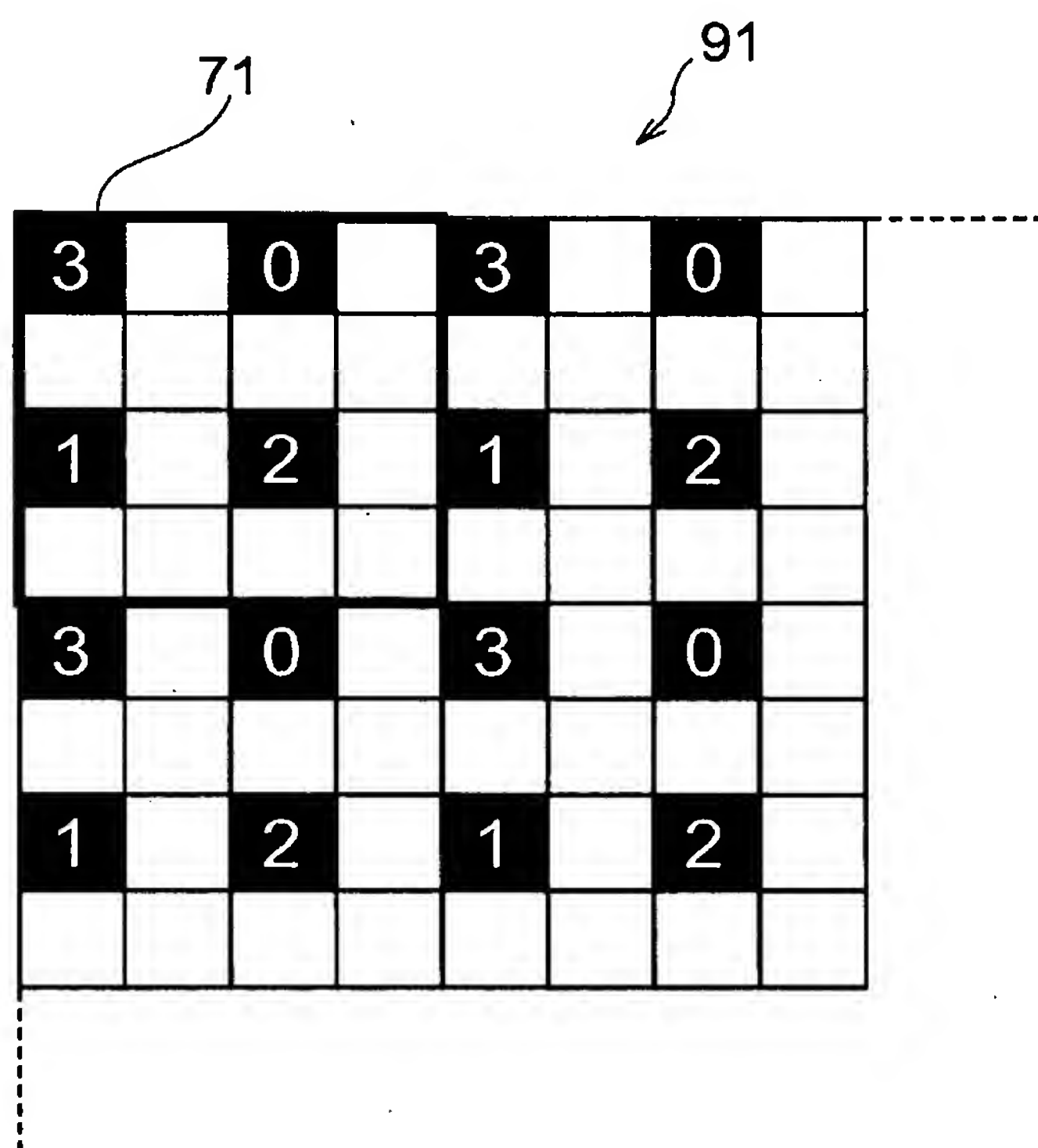
Figure 9 shows a 4x4 grid of squares. The grid is divided into two 2x4 sections. The left section is labeled 71 and the right section is labeled 91. The numbers are arranged in a repeating pattern: Row 1: 0, 3, 0, 3; Row 2: 2, 1, 2, 1; Row 3: 3, 0, 3, 0; Row 4: 1, 2, 1, 2.

[図13]

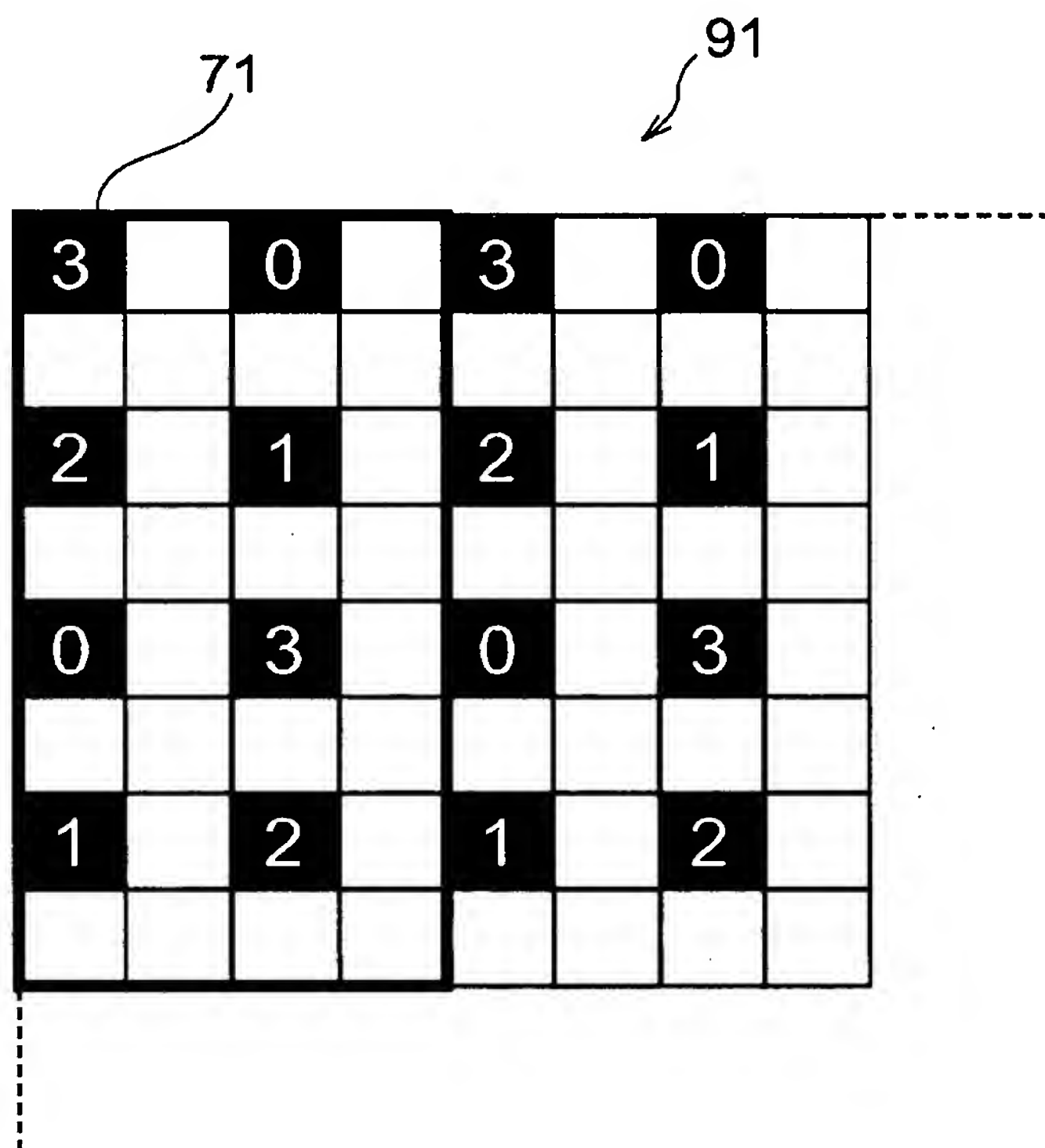




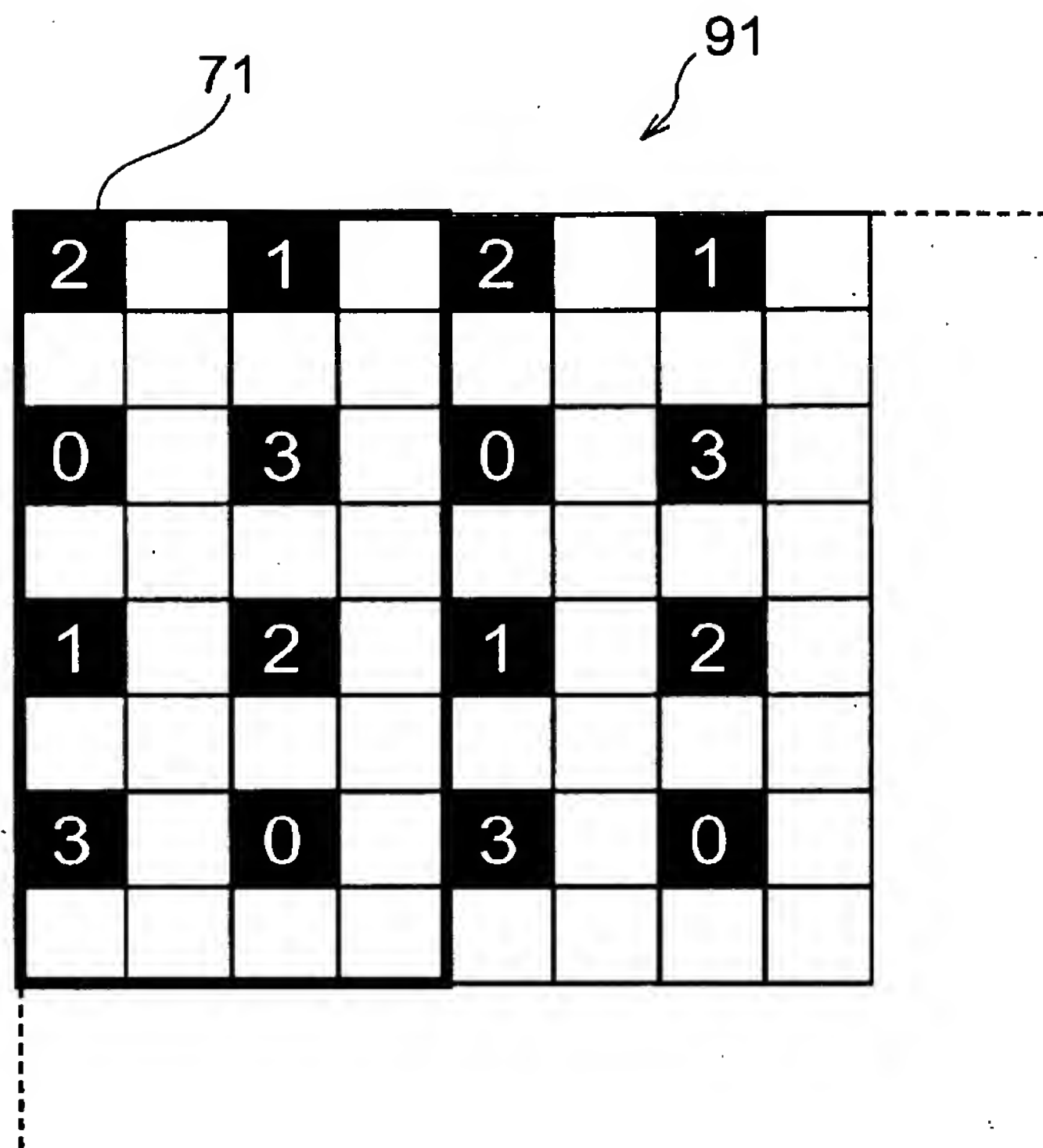
[図14]



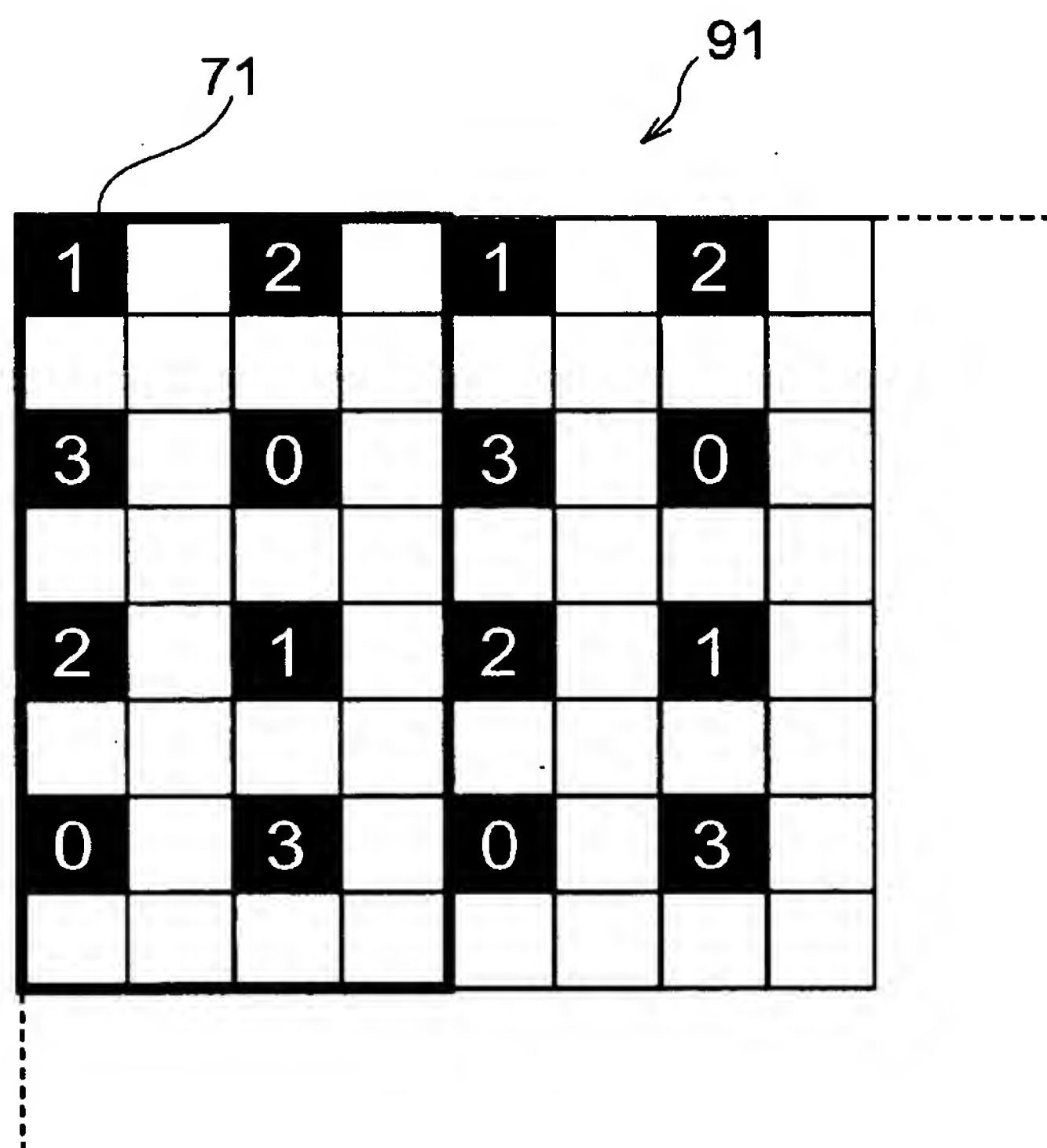
[図15]



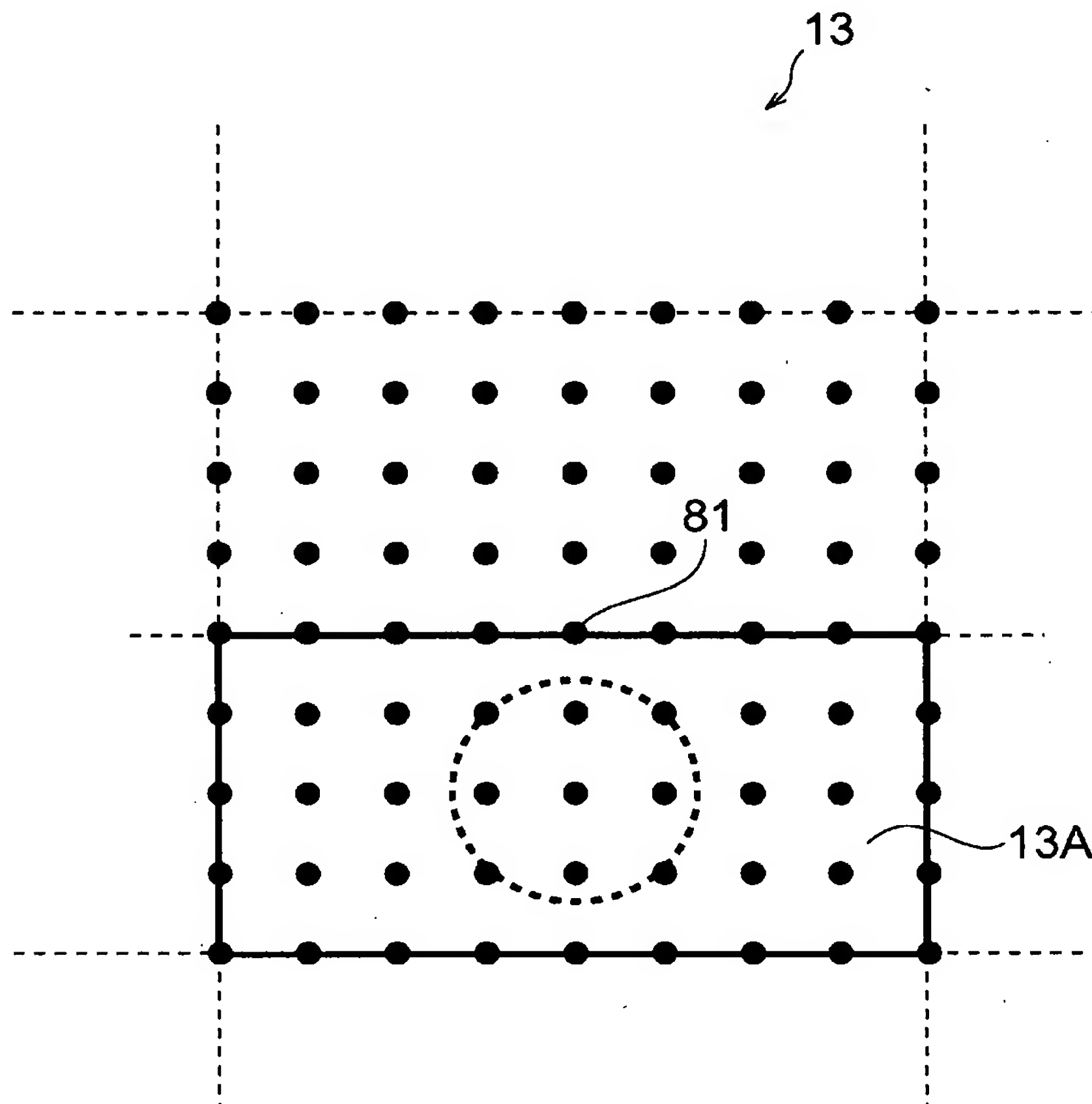
[図16]



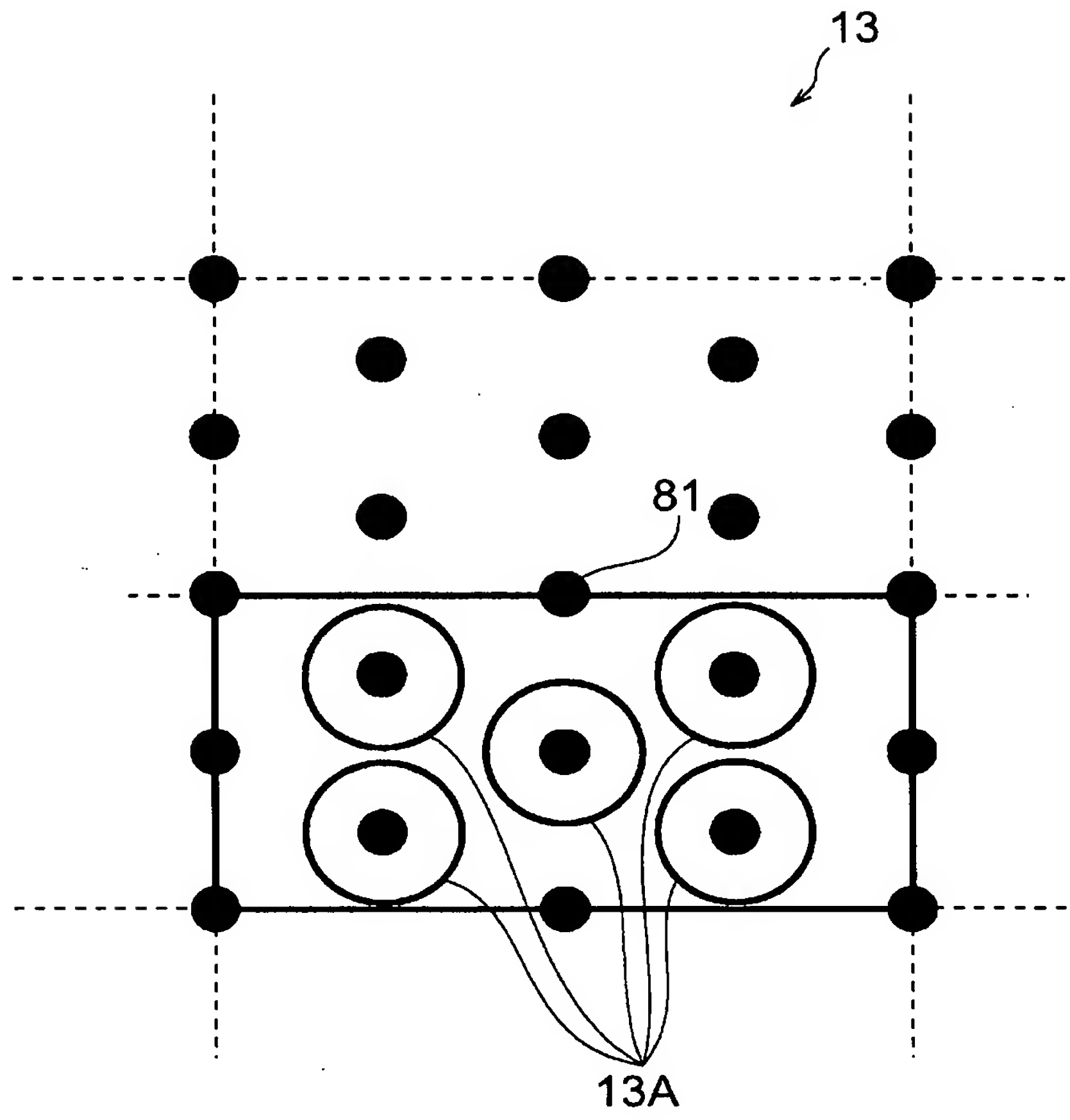
[図17]



[図18]



[図19]





[図20]

